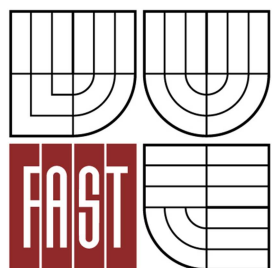




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ PROPUSTNOSTI BETONU PRO VZDUCH A VODU JAKO PODKLAD PRO ODHAD JEHO AKTUÁLNÍ TRVANLIVOSTI

ANALYSIS OF MEASUREMENT RESULTS OF CONCRETE PERMEABILITY FOR AIR  
AND WATER AS A BASIS FOR ESTIMATING THE ACTUAL DURABILITY

DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ING. ZLATA KADLECOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ ANTON, Ph.D.

BRNO 2016



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

|                                |                                                         |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Studijní program</b>        | P3607 Stavební inženýrství                              |
| <b>Typ studijního programu</b> | Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia |
| <b>Studijní obor</b>           | 3911V006 Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství   |
| <b>Pracoviště</b>              | Ústav stavebního zkušebnictví                           |

## ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

**Diplomant** Ing. Zlata Kadlecová

**Název** Analýza výsledků měření propustnosti betonu pro vzduch a vodu jako podklad pro odhad jeho aktuální trvanlivosti

**Vedoucí disertační práce** Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

**Datum zadání  
disertační práce**

**Datum odevzdání  
disertační práce**

V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání diplomové práce

V Brně dne

.....  
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.  
Vedoucí ústavu

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



**Podklady a literatura**

**Zásady pro vypracování**

**Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

Ing. Ondřej Anton, Ph.D.  
Vedoucí disertační práce

## **Abstrakt**

Propustností povrchové vrstvy betonu se zabývá mnoho vědeckých pracovišť po celém světě, neboť povrchová vrstva je nejslabším článkem celé betonové konstrukce. Tato disertační práce navázala na problematiku celosvětově řešenou a rozšíří obzor problematiky propustnosti povrchové vrstvy.

Cílem této práce bylo vytvořit přepočtové vztahy mezi metodami pro hodnocení propustnosti povrchových vrstev betonu a umožnit tak orientační hodnocení povrchové vrstvy betonu v závislosti na aktuální vlhkosti. V praxi se nejčastěji vyskytují betony, jejichž povrchová hmotnostní vlhkost je rovna 3 %, proto byla tato výše vlhkosti zvolena jako referenční. Pro srovnávání byly použity: přístroj TPT (Torrent Permeability Tester), přístroj GWT (Germanns Water Permeability Tester) a metody ISAT (Initial Surface Absorption Test). Dílčím cílem bylo vytvořit jednotné metodiky pro měření s přístroji.

## **Klíčová slova**

Beton, trvanlivost, vodní a vzduchová propustnost, povrchová vrstva, vlhkost, TPT, GWT, ISAT, KAKASO.

## **Abstract**

Permeability surface layer of concrete is engaged in many research institutes around the world, because the surface layer is the weakest link in the entire concrete structure. This dissertation followed on the issue of global solutions and broadens the horizon of the covercrete issues.

The aim of this work was to create the conversion relations between the methods for evaluating the permeability of concrete surface layer allow approximate evaluation of the surface layer of concrete depending on the current moisture. In practice mostly occur concrete, which surface mass of moisture is equal to 3 %, so this amount of moisture is selected as the reference. For comparison were used: the device TPT (Torrent Permeability Tester), device GWT (Germanns Water Permeability Tester) and methods ISAT (Initial Surface Absorption Test). A secondary aim was to create a unified methodology for measuring the device.

## **Keywords**

Concrete, durability, water and air permeability, covercrete, humidity, TPT, GWT, ISAT, KAKASO.

Ing. Zlata Kadlecová *Analýza výsledků měření propustnosti betonu pro vzduch a vodu jako podklad pro odhad jeho aktuální trvanlivosti*. Brno, 2015. 153 s., 196 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 12. 2015

.....

podpis autora

Ing. Zlata Kadlecová

### **Poděkování**

Děkuji za odborné vedení, cenné rady a připomínky všem spřízněným duším a odborným pracovníkům ÚSZK. Děkuji ÚTHD a blízkým, že se mnou měli tu trpělivost a vydrželi na toto dílo tak dlouho čekat.

**OBSAH:**

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 ÚVOD .....</b>                                                              | <b>11</b> |
| <b>2 REŠERŠE STÁVAJÍCÍHO STAVU .....</b>                                         | <b>13</b> |
| 2.1 Pórová struktura betonu .....                                                | 13        |
| 2.1.1 Charakteristika pórového systému betonu [11][1][12] .....                  | 13        |
| 2.1.2 Krycí vrstva betonu .....                                                  | 20        |
| 2.2 Transportní jevy v betonu .....                                              | 21        |
| 2.2.1 Difúze [1], [4] .....                                                      | 22        |
| 2.2.1 Propustnost [1] .....                                                      | 23        |
| 2.2.2 Absorpce, kapilární sorpce a sorptivita [4, 10] .....                      | 26        |
| 2.2.3 Adsorbce [12] .....                                                        | 29        |
| 2.2.4 Nasákavost [12] [75] .....                                                 | 29        |
| 2.2.5 Vodotěsnost [12] .....                                                     | 31        |
| 2.2.6 Elektrická vodivost betonu - migrace iontů [4], [12], [39] .....           | 31        |
| 2.2.7 Tepelná vodivost [12] .....                                                | 32        |
| 2.2.8 Mrazuvzdornost .....                                                       | 33        |
| 2.2.9 Transport iontů .....                                                      | 33        |
| 2.2.10 Penetrabilita .....                                                       | 33        |
| 2.3 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ PROPUSTNOSTI A SORPTIVITY .....                         | 34        |
| 2.3.1 Nedestruktivní přístroje pro měření vnikání/ transportu/toku vody .....    | 39        |
| 2.3.1.1 Autoclam Permeability System .....                                       | 40        |
| 2.3.1.2 CLAM .....                                                               | 42        |
| 2.3.1.3 FTP (The Field Permeability Test) .....                                  | 42        |
| 2.3.1.4 Figg Test .....                                                          | 43        |
| 2.3.1.5 Figg Test upravený – CAT (Covercrete Absorption Test) .....              | 44        |
| 2.3.1.6 Figg Test upravený – Poroscope-Plus .....                                | 45        |
| 2.3.1.7 GWT (Germanns Water Permeability Tester) .....                           | 46        |
| 2.3.1.8 ISAT (Initial Surface Absorption Test) .....                             | 46        |
| 2.3.1.9 POROSItester .....                                                       | 46        |
| 2.3.1.10 Standpipe Test .....                                                    | 47        |
| 2.3.1.11 Steinert .....                                                          | 48        |
| 2.3.1.12 SWAT (Surface Water Absorption Test) .....                              | 48        |
| 2.3.2 Nedestruktivní přístroje pro měření vnikání/transportu/ toku vzduchu ..... | 50        |
| 2.3.2.1 Autoclam .....                                                           | 50        |
| 2.3.2.2 Cembureau .....                                                          | 51        |
| 2.3.2.3 Figg Test .....                                                          | 52        |
| 2.3.2.4 Figg Test upravený – Poroscope-Plus .....                                | 53        |
| 2.3.2.5 GGT (German's Gas Test) .....                                            | 54        |
| 2.3.2.6 Hong-Parrott .....                                                       | 55        |
| 2.3.2.7 OPI Test (The South African Qxygen permeability index test) .....        | 57        |
| 2.3.2.8 Paulmann .....                                                           | 57        |
| 2.3.2.9 SAF (Surface Airflow Test) .....                                         | 58        |
| 2.3.2.10 Schönlin .....                                                          | 59        |
| 2.3.2.11 Permea-TORR .....                                                       | 60        |
| 2.3.2.12 TPT (Torrent Permeability Tester) .....                                 | 63        |
| 2.3.2.13 TUD (Technical University of Delft) .....                               | 63        |
| 2.3.2.14 Zia-Guth .....                                                          | 65        |
| 2.4 SROVNÁVACÍ TESTY .....                                                       | 66        |
| <b>3 CÍL PRÁCE .....</b>                                                         | <b>67</b> |

|            |                                                                                                                                                                                              |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b>   | <b>METODIKA PROVÁDĚNÝCH PRACÍ .....</b>                                                                                                                                                      | <b>69</b> |
| <b>5</b>   | <b>POSTUP PRACÍ V JEDNOTLIVÝCH ETAPÁCH .....</b>                                                                                                                                             | <b>72</b> |
| <b>5.1</b> | <b>ETAPA 1 – PODROBNÉ SEZNÁMENÍ S MĚŘICÍMI PŘÍSTROJI .....</b>                                                                                                                               | <b>72</b> |
| 5.1.1      | TPT (Torrent Permeability Tester) .....                                                                                                                                                      | 72        |
| 5.1.2      | GWT (Germanns Water Permeability Tester) .....                                                                                                                                               | 76        |
| 5.1.3      | ISAT (Initial Surface Absorption Test) .....                                                                                                                                                 | 79        |
| 5.1.4      | KAKASO (PSMXi) .....                                                                                                                                                                         | 87        |
| <b>5.2</b> | <b>ETAPA 2 – NÁVRH VELIČIN PRO EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ.....</b>                                                                                                                             | <b>88</b> |
| <b>5.3</b> | <b>ETAPA 3 – NÁVRH A MNOŽSTVÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES, RECEPTURY, ULOŽENÍ.....</b>                                                                                                                  | <b>89</b> |
| 5.3.1      | Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.....                                                                                                                                       | 89        |
| 5.3.1.1    | Zkušební tělesa a jejich množství .....                                                                                                                                                      | 89        |
| 5.3.1.2    | Receptura čerstvého betonu.....                                                                                                                                                              | 89        |
| 5.3.1.3    | Způsob a doba uložení zkušebních těles.....                                                                                                                                                  | 89        |
| 5.3.2      | Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech.....                                                                         | 90        |
| 5.3.2.1    | Zkušební tělesa a jejich množství .....                                                                                                                                                      | 90        |
| 5.3.2.2    | Receptura čerstvého betonu.....                                                                                                                                                              | 90        |
| 5.3.2.3    | Způsob a doba uložení zkušebních těles.....                                                                                                                                                  | 90        |
| 5.3.3      | Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny.....                                                    | 91        |
| 5.3.3.1    | Zkušební tělesa a jejich množství .....                                                                                                                                                      | 91        |
| 5.3.3.2    | Receptura čerstvého betonu.....                                                                                                                                                              | 91        |
| 5.3.3.3    | Způsob a doba uložení zkušebních těles.....                                                                                                                                                  | 93        |
| 5.3.4      | Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti.....                                                       | 93        |
| 5.3.4.1    | Zkušební tělesa a jejich množství .....                                                                                                                                                      | 93        |
| 5.3.4.2    | Receptura čerstvého betonu.....                                                                                                                                                              | 93        |
| 5.3.4.3    | Způsob a doba uložení zkušebních těles.....                                                                                                                                                  | 93        |
| 5.3.5      | Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu .....                                                | 94        |
| 5.3.5.1    | Zkušební tělesa a jejich množství .....                                                                                                                                                      | 94        |
| 5.3.5.2    | Receptura čerstvého betonu.....                                                                                                                                                              | 94        |
| 5.3.5.3    | Způsob a doba uložení zkušebních těles.....                                                                                                                                                  | 94        |
| <b>5.4</b> | <b>ETAPA 4 – VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A ZPŮSOB ZRÁNÍ .....</b>                                                                                                                                | <b>94</b> |
| 5.4.1      | Výroba zkušebních těles a způsob zrání - Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.....                                                                                              | 95        |
| 5.4.2      | Výroba zkušebních těles a způsob zrání - Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech 96                                  |           |
| 5.4.3      | Výroba zkušebních těles a způsob jejich zrání - Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny.....    | 97        |
| 5.4.4      | Výroba zkušebních těles a způsob jejich zrání - Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti..... | 97        |
| 5.4.5      | Výroba zkušebních těles a způsob zrání - Experimentální měření v rámci projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu ..... | 97        |
| <b>5.5</b> | <b>ETAPA 5 – EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ .....</b>                                                                                                                                                 | <b>98</b> |
| 5.5.1      | Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.....                                                                                                                                       | 98        |

|            |                                                                                                                                                           |            |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.1.1    | Cíl experimentálních prací a měřené parametry .....                                                                                                       | 98         |
| 5.5.1.2    | Postup experimentálního měření .....                                                                                                                      | 98         |
| 5.5.1.3    | Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané .....                                                                                                    | 98         |
| 5.5.2      | Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech.....                                      | 101        |
| 5.5.2.1    | Cíl experimentálních prací a měřené parametry .....                                                                                                       | 101        |
| 5.5.2.2    | Postup experimentálního měření .....                                                                                                                      | 101        |
| 5.5.2.3    | Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané .....                                                                                                    | 102        |
| 5.5.3      | Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny a další dílčí měření | 105        |
| 5.5.3.1    | Cíl experimentálních prací a měřené parametry .....                                                                                                       | 105        |
| 5.5.3.2    | Postup experimentálního měření .....                                                                                                                      | 105        |
| 5.5.3.3    | Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané .....                                                                                                    | 106        |
| 5.5.4      | Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti.....                    | 109        |
| 5.5.4.1    | Cíl experimentálních prací a měřené parametry .....                                                                                                       | 109        |
| 5.5.4.2    | Postup experimentálního měření .....                                                                                                                      | 110        |
| 5.5.4.3    | Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané .....                                                                                                    | 110        |
| 5.5.4.4    | Stav normalizace pro stanovení počáteční povrchové absorpce.....                                                                                          | 110        |
| 5.5.5      | Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrch. vrstev betonu .....                 | 116        |
| 5.5.5.1    | Cíl experimentálních prací a měřené parametry .....                                                                                                       | 116        |
| 5.5.5.2    | Postup experimentálního měření .....                                                                                                                      | 116        |
| 5.5.5.3    | Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané .....                                                                                                    | 117        |
| <b>5.6</b> | <b>ETAPA 6 – ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>                                                                                                          | <b>118</b> |
| 5.6.1      | Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.....                                                                                                    | 118        |
| 5.6.2      | Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech.....                                      | 119        |
| 5.6.3      | Experimentální měření v projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny .....                      | 120        |
| 5.6.4      | Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti.....                    | 121        |
| 5.6.5      | Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu .....             | 121        |
| <b>5.7</b> | <b>ETAPA 7 – VYTVOŘENÍ PŘEPOČTOVÝCH VZTAHŮ A ZÁVĚREČNÁ ANALÝZA DAT .....</b>                                                                              | <b>121</b> |
| <b>6</b>   | <b>VZNIK METODIK .....</b>                                                                                                                                | <b>136</b> |
| <b>7</b>   | <b>VĚDECKÝ PŘÍNOS .....</b>                                                                                                                               | <b>137</b> |
| <b>8</b>   | <b>ZÁVĚR .....</b>                                                                                                                                        | <b>138</b> |
| <b>9</b>   | <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>                                                                                                                      | <b>140</b> |
| <b>10</b>  | <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>                                                                                                           | <b>144</b> |
| <b>11</b>  | <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                                                                                                                                 | <b>144</b> |
| <b>12</b>  | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                                                                                                                               | <b>145</b> |
| <b>13</b>  | <b>SEZNAM TABULEK .....</b>                                                                                                                               | <b>149</b> |
| <b>14</b>  | <b>PUBLIKAČNÍ ČINNOST .....</b>                                                                                                                           | <b>151</b> |



## 1 ÚVOD

I když je v současnosti beton nejpoužívanějším stavebním materiálem a brzy bude mít své 200. výročí použití v ČR, při jeho výrobě se stále chybí. Jedním z hlavních důvodů, proč se setkáváme s poruchami betonových konstrukcí je fakt, že při návrhu betonu se klade největší důraz na pevnost betonu v tlaku, nikoliv na charakteristiku prostředí, která určuje dobu životnosti konstrukce. Je důležité si uvědomit, že životnost není stanovena tlakovou pevností, ale vlastnostmi prostředí, ve kterém se beton nachází. Při návrhu je nutné nejprve definovat vlivy, kterým budou betonové konstrukce v daném prostředí po celou svou životnost podléhat. Mezi činitele ovlivňující odolnost betonové konstrukce řadíme chemické a fyzikální složení cementového kamene, pórovou strukturu betonu, minimální průřez konstrukce, vlastnosti styčné plochy povrchu a požadovanou životnost [1].

Z hlediska životnosti betonových i železobetonových konstrukcí hraje velmi důležitou roli trvanlivost. Pojem trvanlivost je obecný termín, který není normou specifikovaný, ale je všeobecně definován jako odolnost betonu proti povětrnostním vlivům, chemickým účinkům, abrazi a dalším degradačním procesům po dobu své životnosti v předepsaném prostředí. Trvanlivost betonu musí převyšovat svoji předepsanou životnost a ve většině případů je voda nejagresivnějším médiem zhoršujícím stav konstrukce. Nedostatečná trvanlivost je způsobena degradačními procesy: betonových prvků chloridy, karbonáty, křemičito-alkalickou reakcí nebo nedostatečnou mrazuvzdorností.

Trvanlivost vyjadřuje schopnost konstrukce nebo její části udržovat provozuschopnost po navrhované časové období vzhledem k předepsanému prostředí [6]. Při hodnocení **aktuální trvanlivosti**, tj. trvanlivosti v tomto okamžiku (dnes, nyní), rozumíme pod pojmem trvanlivosti aktuální stav materiálu a konstrukce v závislosti na čase. Hodnotíme tedy soubor vlastností materiálu v okamžiku jeho hodnocení. Mezi trvanlivostní charakteristiky betonu řadíme zejména tyto vlastnosti: pevnost betonu v tlaku, v příčném tahu, tahu ohybem, stanovení modulu pružnosti v tlaku (tahu), odtrhová pevnost, propustnost pro tlakovou vodu, propustnost pro kapaliny a plyny, absorpční vlastnosti, difúzní vlastnosti, mrazuvzdornost, odolnost vůči posypovým solím, kvantifikace trhlin na povrchu betonu (způsobené chybami v technologii výroby, ukládání a ošetřování, zatěžování, působení vnějších vlivů (agresivní látky)), odolnost proti působení agresivních látek -  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ , síranům, alkáliím, atd. Všechny výše uvedené zkoušky se týkají povrchové vrstvy betonu (s výjimkou jádrových vývrtů a modulů pružnosti) a můžeme tedy konstatovat, že povrchová vrstva betonu je vstupní branou pro působení všech vlivů, které způsobují zhoršující se stav konstrukce.

Mnohá vědecká pracoviště\* se domnívají, že trvanlivost nelze popsat pouze jednou zkouškou, ale že je pro popsání stavu povrchové vrstvy betonu třeba kombinace různých zkoušek. Ve většině případů se shodují na tom, že nejlépe mohou vystihnout vlastnosti

povrchové vrstvy zkoušky propustnosti pro kapaliny a plyny [35], protože trvanlivost je funkcí propustnosti [7].

Kvalita povrchové vrstvy se obvykle liší od matrice betonu, neboť mikrostruktura betonu je různá na povrchu i uvnitř. Z tohoto důvodu je důležité, aby byla tenká povrchová vrstva betonu odolná proti pronikání škodlivých látek. Je-li beton vystaven účinkům chemických látek, je důležité navrhnout beton s co nejnížší pórovitostí a permeabilitou betonu, aby se zabránilo pronikání agresivních iontů do struktury betonu. Lze toho dosáhnout snížením vodního součinitele, čímž také dosáhneme zvýšení pevnosti betonu. V budoucnosti bude vysokohodnotný beton využíván zejména z důvodu trvanlivosti, nikoliv z důvodu vysokých pevností. Při změně užívání stavby je nutné ověřit nové okolní podmínky stavby (agresivitu prostředí) tak, aby nedošlo ke zbytečnému poškození betonových konstrukcí jako celku. Pouze statické ověření není dostatečné, neboť trvanlivost v první řadě závisí na vlastnostech povrchové vrstvy [7].

Aby bylo možné posoudit kvalitu povrchové vrstvy, bylo vyvinuto několik zkušebních metod, které simulují přirozený jev pronikání agresivních látek do betonu. Většina poruch železobetonových konstrukcí je způsobena v důsledku pohybu vody do betonu přes mikrotrhliny, proto je také více metod pro stanovení vodní propustnosti, nežli vzduchové. Při měření vzduchové propustnosti je ale používán vyšší tlak, než je tomu ve skutečnosti. I když takovéto podmínky v praxi prakticky neexistují, nově vyvinuté přístroje se snaží přiblížit podmínkám dle skutečnosti, tj. tlaku deštěm a větrem.

Současné výzkumné a vývojové práce jsou v podstatě založeny na snaze snížit porozitu betonového kompozitu na minimum.

Tato práce se zabývá hodnocením kvality povrchové vrstvy betonových konstrukcí, navazuje na četné výzkumy v oblasti propustnosti a doplňuje dosud neobjevené skutečnosti týkající se metod TPT, ISAT a GWT.

---

\* Vybraná vědecká pracoviště a vědeckí pracovníci zabývající se propustností betonu:

- Holcem Group Support Ltd., Holderbank, Switzerland (Dr. R. Torrent);
- Institute of Construction Science „Eduardo Torroja“, Madrid, Spain (L.F. Luco);
- University of Cape Town (Prof. M.G. Alexander);
- Queen's University, United Kingdom (Prof. P.A.M. Basheer);
- Technical Research and Consulting on Cement and Concrete (TFB), Wildeg, Switzerland (Dr. F. Jacobs);
- Fakulty of Virginia Polytechnic Institute, USA (J.W. Bryant Jr.);
- University of New Orleans (C.E. Zarraga, D.A. Lange);
- Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan (T. Kishi); a další.

## 2 REŠERŠE STÁVAJÍCÍHO STAVU

V této kapitole jsou popsána základní fakta týkající propustnosti a trvanlivosti krycí vrstvy betonu. Významný je i přehled metod pro měření vodní a vzduchové propustnosti a absorpce. Kapitola je rozčleněna na následující podkapitoly:

### 2.1 Pórová struktura betonu

#### 2.2 Transportní jevy v betonu

#### 2.3 Přístroje pro měření propustnosti a sorptivity

### 2.1 Pórová struktura betonu

Kvantitativním a velmi důležitým krokem v poznání kompozitního charakteru betonu byla práce T. C. Powerse, který prokázal, že pevnost, trvanlivost, mrazuvzdornost a vodopropustnost jsou funkcí pórové struktury betonu. Toto tvrzení vychází ze skutečnosti, že každá pevná látka složená z částic je jak pórovitá, tak propustná. Vzhledem k tomu, že cementová pasta takovouto strukturu má, je skutečně zároveň propustná i pórovitá. Nej hustší cementové pasty mají pórovitost cca 26 %, ale obvykle se jedná o vyšší hodnoty, které závisí jen na původním obsahu vody a stupni hydratace (tj. závisí na vodním součiniteli a podmínkách tvrdnutí). [23]

#### 2.1.1 Charakteristika pórového systému betonu [11][1][12]

Nejslabším článkem betonu, který má rozhodující vliv na výsledné vlastnosti betonu, je cementový kámen. Cementový kámen má pórovou strukturu a vzniká při tvrdnutí betonu přechodem cementového tmele ze suspenze do tuhého skupenství. Cementový kámen je definován jako kapilárně pórovitá látka, která má největší vliv na pevnostní charakteristiky betonu, moduly pružnosti, permeabilitu a trvanlivost. Pórovitost cementového kamene je tvořena:

- množstvím vody nepotřebné k hydrataci cementu, tj.  $w > 0,23$ ,
- vzduchovými póry vzniklými nedokonalým zhutněním čerstvého betonu,
- provzdušňovacími přísadami (sférické uzavřené póry),
- trhlinkami vzniklými při tvrdnutí betonu s šířkou větší než 0,1 mm (vliv zatěžování).

Celková pórovitost betonu se vypočte dle vztahu [12]:

$$p_{CK} = 1 - \frac{\rho_{CK}}{\rho}, \text{ kde} \quad (1)$$

$\rho_{CK}$ ...objemová hmotnost včetně pórů [ $\text{kg.m}^{-3}$ ],  $\rho$ ...objemová hmotnost cementového kamene bez pórů [ $\text{kg.m}^{-3}$ ].

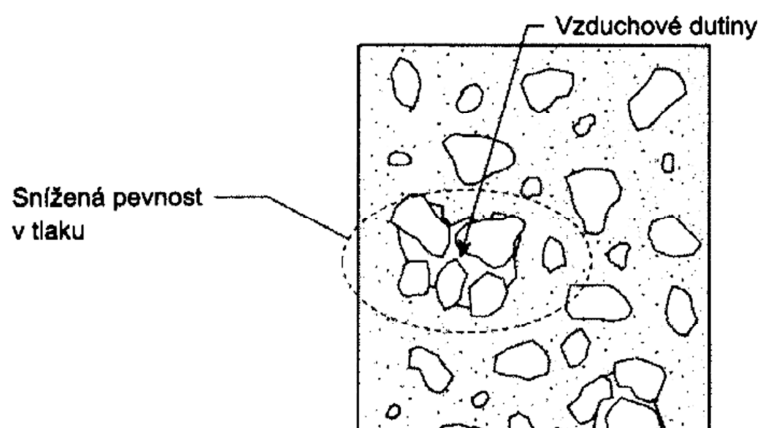
Tvar pórů úzce souvisí s průchodem kapaliny nebo plynů pórovitým prostředím. Rozeznáváme tyto póry:

- **otevřené průchodné** (kapiláry) odpovídají nasákavosti stanovené při 20 °C, nemají po celé délce stejný průřez (zужují se a rozšiřují se),
- **otevřené neprůchodné**, které pro úplné vyplnění kapalinou vyžadují značný tlak kapaliny,
- **uzavřené** - nezaplnitelné kapalinou.

Póry lze rozdělit podle velikosti, jejich vzniku a podle jejich vlivu na vlastnosti cementového kamene a tím i samotného betonu. Distribuce pórů vyjadřuje závislost velikosti pórů na objemovém zastoupení celkové otevřené pórovitosti. Nejrozšířenější metodou pro stanovení distribuce pórů je **rtuťová porozimetrie**. MIP (Merkury Intrusion Porosimetry) tlakem rtuti až  $10^3 \text{ N.mm}^{-2}$  vyplňuje póry velikost od 0,1 mm až do  $0,2 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$  (poloměr kapiláry je nepřímo úměrný tlaku rtuti). Tato metoda ale není schopna zhodnotit komplexní stav struktury betonu, neboť vyhodnocuje a měří póry z velmi malého vzorku betonu. [25]

Pórovitost cementového kamene se skládá z pórů vzniklých v čerstvém a zatvrdlém betonu a z pórů vzniklých při hydrataci. Podle rozměrů dělíme póry na makropóry a mikropóry a celková pórovitost cementového kamene je součtem všech dílčích pórů:

- **MAKROPÓRY s průměrem  $> 1 \mu\text{m}$ :**
  - **technologické póry  $P_T$**  – vyskytují se pouze u betonů s cementovou matricí a vznikají *nedostatečným ztuhnutím* čerstvého betonu nebo sedimentací jemných částic pod zrno kameniva = **tzv. sedimentační póry**. Tyto póry jsou závažným defektem makrostruktury betonu, neboť při odměšování části záměsové vody obtékají zrno kameniva, vystupují k povrchu a tvoří soustavu otevřených pórů. Další část sedimentačních pórů se nachází pod zrny kameniva (Obr. 1), kde v kontaktní zóně narušují soudržnost kameniva a cementového kamene. Jejich rozměr je **50  $\mu\text{m}$  ~ 100  $\mu\text{m}$** .



Obr. 1 Vznik vzduchových dutin v důsledku nesprávného ukládání betonu [6], [38]

Dle vyjádření některých vědců jsou právě tyto póry hlavní cestou pronikání vody do struktury betonu, neboť pohyb této volné vody podléhá působení gravitačních sil, ale zanedbatelnému

hydrostatickému tlaku, což značně usnadňuje pronikání vody betonem, včetně vnikání agresivních látek, s následným podstatným ovlivněním výsledné trvanlivosti celé betonové konstrukce.

Množství technologických pórů lze stanovit následovně [12]:

$$P_T = 1 - \frac{\rho_{CB}}{\rho_{AV}} [-], \text{ kde} \quad (2)$$

$\rho_{CH}$ ...objemová hmotnost ČB [kg.m<sup>-3</sup>],  $\rho_{AT}$ ...objemová hmotnost vypočtená z absolutních objemů složek ČB [kg.m<sup>-3</sup>],

- **provzdušňovací póry  $P_P$**  (sférické) – vznikají použitím provzdušňovacích přísad a provzdušněním ČB mícháním. Póry mají kulovitý tvar s průměrem **50  $\mu\text{m}$  ~ 300  $\mu\text{m}$**  a jsou zastoupeny v max. 4 ~ 6 % objemu betonu.

- **MIKROPÓRY s průměrem < 1  $\mu\text{m}$ :**

- **gelové póry  $P_G$**  – spojitě póry obsahující vodu, která se při běžných teplotách neodpaří, ale odpaří se při teplotách vyšších než 105 °C. V těchto pórech je voda vázána fyzikálními silami na strukturu kalciumhydrosilikátů (gelové póry jsou součástí C-S-H gelu). Velikost pórů je **2 nm** a podíl je 0,28 ~ 0,40. Množství gelových pórů lze vypočítat z následujícího vztahu [12]:

$$P_G = \frac{0,13 \cdot \alpha_H \cdot m_C}{\rho_V} [-], \text{ kde} \quad (3)$$

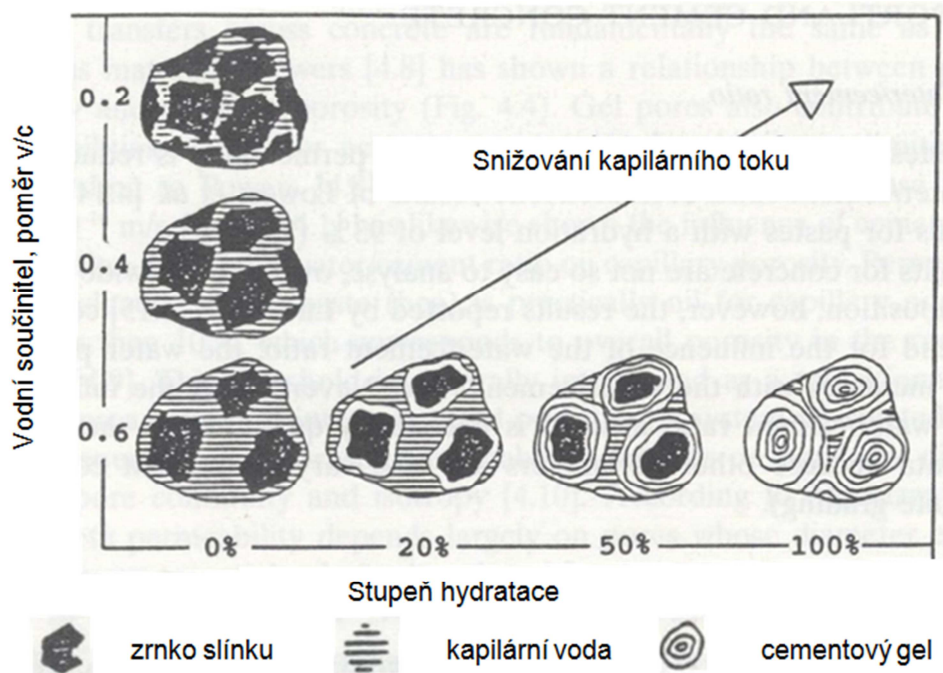
$\alpha_H$ ...stupeň hydratace, např. dle Powerse  $\alpha_H = 0,9 \cdot \sqrt{w}$  (28 dní),  $m_C$ ...množství cementu [kg.m<sup>-3</sup>],  $\rho_V$ ...objemová hmotnost vody [kg.m<sup>-3</sup>].

Gelové póry se nacházejí uvnitř pevných částic, které tvoří cementovou pastu (cca 28 % objemu pevné fáze) a jejich velikost a rozmístění lze velmi těžko ovlivnit, kdežto kapilární póry se vyskytují mezi těmito částicemi a lze je ovlivnit vodním součinitelem nebo stupněm hydratace (Obr. 2).

- **hydratační póry  $P_H$**  – voda potřebná na hydrataci slínkových minerálů (23 ~ 26 % z hmotnosti cementu) se spotřebuje a uvolní tím kapilární prostor. Objem těchto pórů v betonu je asi 8 % a jejich velikost je cca **8 ~ 20 nm**, a stanoví se následovně [12]:

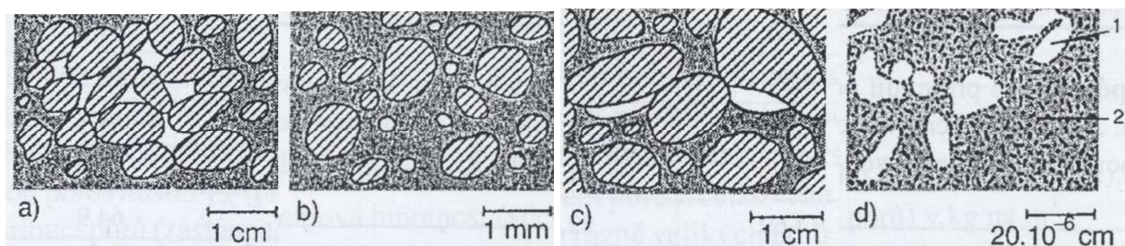
$$P_H = \frac{0,25 \cdot \alpha_H \cdot m_C}{4 \cdot \rho_V} [-], \text{ kde} \quad (4)$$

$\alpha_H$ ...stupeň hydratace, např. dle Powerse  $\alpha_H = 0,9 \cdot \sqrt{w}$  (28 dní),  $m_C$ ...množství cementu [kg.m<sup>-3</sup>],  $\rho_V$ ...objemová hmotnost vody [kg.m<sup>-3</sup>].



Obr. 2 Závislost vodního součinitele na stupni hydratace [4]

- **kapilární póry  $P_K$**  – jsou způsobené nadměrným množstvím vody nad potřebnou hodnotu, tj. 0,25 na hydrataci a 0,13 gelové vody. Pokud je vodní součinitel nižší než 0,38, zůstane část nezhydratovaného cementu. Patří sem póry s průměrem **menším než 30  $\mu\text{m}$** , ve kterých je voda pevně poutána především povrchovým napětím, a menisky povrchu jsou konkávní. Celkový objem kapilárních pórů závisí na množství záměsové vody a době hydratace, kdy se jejich objem zmenšuje z cca 40 % až na 0 % objemu cementového kamene z důvodu zvětšování objemu gelových pórů. Kapilární póry mají na rozdíl od gelových pórů nespojitou strukturu, která má příznivý vliv na snížení propustnosti betonu a zvýšení jeho trvanlivosti. Ztráta kapilární vody v malých kapilárách se projevuje smrštěním.



Obr. 3 Schématické znázornění pórů v cementovém gelu betonu [12]:

a) technologické póry, b) provzdušňovací póry, c) sedimentační póry, d) kapilární póry;  
1-kapilární póry, 2-cementový gel s gelovými póry.

Při průměru **větším než 30  $\mu\text{m}$**  se již vlastně nejedná o póry, ale o **dutiny** a strukturální nepravidlosti materiálu, kde se kapilární síly projevují nepatrně. Povrch hladiny je plochý a k zaplňování vodou dochází pouze účinkem hydrostatického tlaku.

Kapilární pórovitost lze stanovit následovně [12]:

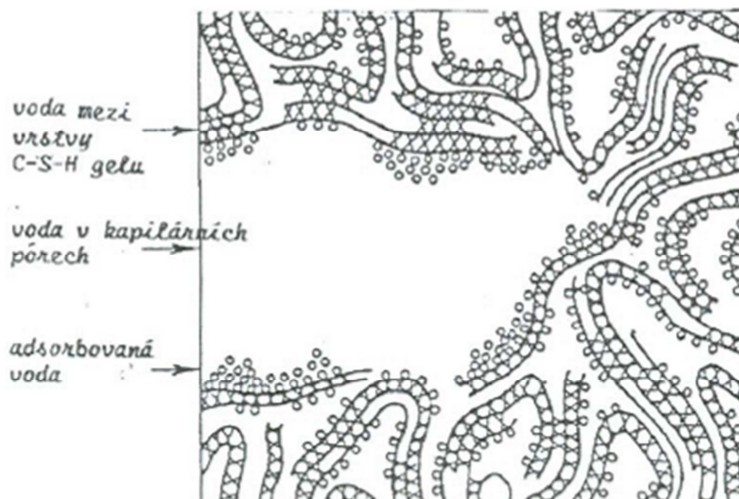
$$P_K = \frac{m_v - 0,38 \cdot \alpha_H \cdot m_c}{\rho_v} = \frac{m_c}{\rho_v} \cdot (w - 0,38 \cdot \alpha_H), \text{ kde} \quad (5)$$

$m_v$ ...množství vody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $m_c$ ...množství cementu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $\alpha_H$ ...stupeň hydratace, např. dle Powerse  $\alpha_H = 0,9 \cdot \sqrt{w}$  (28 dní),  $\rho_v$ ...objemová hmotnost vody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $w$ ...hodnota vodního součinitele [-].

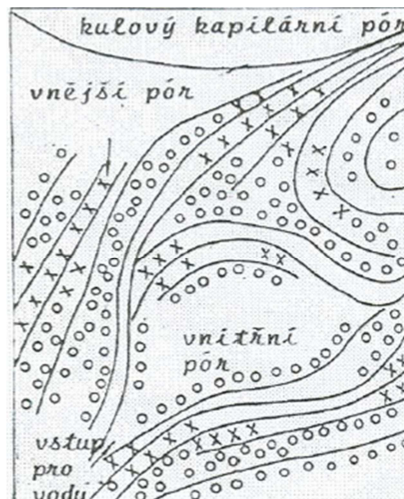
### Kapilární pórovitost ve vztahu k trvanlivosti [52]

Obecně je možné konstatovat, že spojitá pórovitost snižuje trvanlivost betonu, protože umožňuje penetraci agresivních médií do vnitřní struktury betonu. Naopak nespojitá rovnoměrně rozptýlená pórovitost v cementové matrici trvanlivost betonu nesnižuje. Zvýšení trvanlivosti lze dosáhnout snížením kapilární pórovitosti např. kvalitním zhutněním, redukcí vodního součinitele, zvýšením doby ošetřování pro zajištění zvýšeného stupně hydratace.

Póry uvnitř lehkého kameniva nesnižují trvanlivost betonu, neboť trvanlivost betonu není ovlivněna pórovitostí kameniva, nýbrž kapilární pórovitostí zatvrdlé cementové pasty a makropóry z důvodu nedostatečného zhutnění.



Obr. 4 Model vody při hydrataci cementu podle R. F. Feldmana a P. J. Seredy [23], 36



Obr. 5 Model C-S-H gelu podle R. F. Feldmana a P. J. Seredy [23]

Drobné kulové vzduchové póry nespojitě rozložené v cementové matrici s nízkou kapilární pórovitostí hrají velmi důležitou roli pro výrobu kvalitního trvanlivého mrazuvzdorného betonu, protože tyto póry nepodporují penetraci agresivních iontů do betonu. Voda z kapilárních pórů je prvními krystalky ledu vtlačována do těchto vzduchových pórů a snižuje se tak hydraulický tlak způsobující růst objemu díky anomálii vody. Vzdálenost mezi póry musí být max. 400  $\mu\text{m}$ , jinak by docházelo k porušení matrice vlivem zvyšování hydraulického tlaku z růstu ledu.

Velikost pórů také ovlivňuje vlastnosti betonu - vodotěsnost (póry větší než  $5 \cdot 10^{-5}$ ), pevnost (póry větší než  $5 \cdot 10^{-4}$ ), mrazuvzdornost (voda přechází v led při až  $-30^\circ\text{C}$  v pórech

menších než  $5 \cdot 10^{-8}$ ), provzdušněnost (póry větší než  $5 \cdot 10^{-7}$ ), kapilární kondenzaci (póry menší než  $5 \cdot 10^{-7}$ ), a distribuce pórů se mění s dobou hydratace cementu. Další ovlivnění vlastností je popsáno v následující tabulce.

Tab. 1 Klasifikace pórů v hydratované cementové pastě [23], [51]

| Název                             | Velikost                 | Charakteristika                                              | Vztah k vlastnostem betonu                                         |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Technologické póry (sedimentační) | 250 – 2000 $\mu\text{m}$ | vytvořené vodou po odpaření                                  | podstatně ovlivňují pevnost, objemovou hmotnost a propustnost      |
|                                   | 10 $\mu\text{m}$ – velké | zachycené vzduch. póry                                       |                                                                    |
|                                   | 5 – 1000 $\mu\text{m}$   | změrně vnesené (provzduš. přísady), velké, cca kulovité póry |                                                                    |
| Kapilární póry                    | 0,05 – 15 $\mu\text{m}$  | širší kapiláry                                               | ovlivňují pevnost, propustnost, a smrštitelnost na počátku tuhnutí |
|                                   | 50 – 10 nm               | střední kapiláry, kapilární dutiny                           | ovlivňují pevnost, propustnost, a smrštění při vyšší rel. vlhkosti |
| Gelové póry a kapilární póry      | 2,5 – 10 nm              | malé kapiláry                                                | ovlivňují průběh smrštění při rel. vlhkosti mezi 50 a 80 %         |
| Gelové póry                       | 0,5 – 2,5 nm             | mikropóry mezi zhydr. útvary v gelu                          | ovlivňují smrštění a dotvarování                                   |
|                                   | do 0,05 nm               | mikropóry mezi vrstvami gelu                                 | ovlivňují smrštění a dotvarování                                   |

Z výše uvedeného vyplývá, že póry slouží jako cenný zdroj informací o mnohých vlastnostech látky. Informují o deformacích struktury, stupni mechanických napětí, technologických důsledcích pórové látky (pevnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost, smrštění, atd.). Tvar pórů úzce souvisí s průchodem kapaliny nebo plynů pórovitým prostředím.

### Smrštění cementového kamene [12]

Smrštění cementového kamene je také vyvoláno fyzikálně mechanickými pochody a lze jej rozdělit následovně na:

- **vlhkostní smrštění**, které je způsobeno migrací vody v kapilárách a závisí na kapilární pórovitosti a vlhkosti v exteriéru. Voda z kapilár se odpařuje tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání vlhkosti v exteriéru s vlhkostí cementového kamene. Kapilární síly se uplatňují nejvíce v kapilárách nad 0,2  $\mu\text{m}$ , ale v menších kapilárách nastává kondenzace. Vlhkostní smrštění nejvíce ovlivňují kapilární síly v kapilárách o velikosti 0,036 až 0,050  $\mu\text{m}$  a dosahuje hodnot až  $2,5 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ . Vodní uložení betonu může způsobovat bobtnání betonu (nabývání na objemu, naopak zvlhčování či vysušování pórovité struktury cementového kamene způsobuje reversibilní smrštění, které zahrnuje 2/3 celkového smrštění způsobeného migrací vlhkosti.

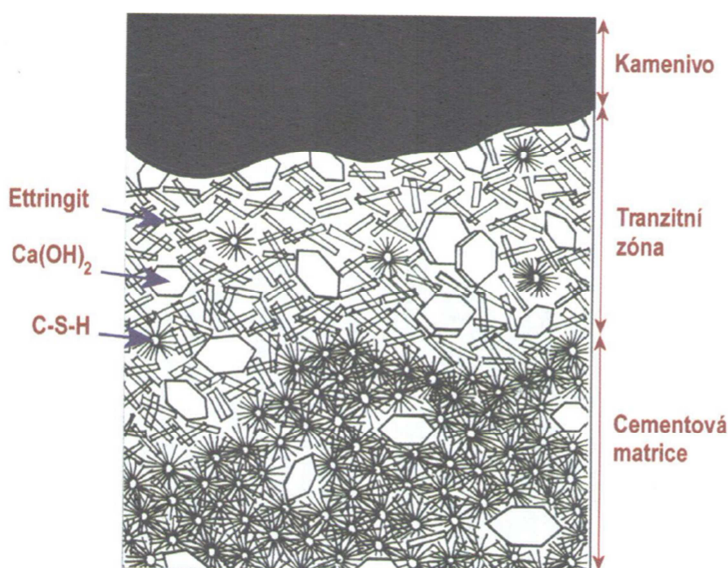


- **hydratační smrštění**, které je způsobeno hydratací slinkových minerálů z důvodu objemových změn a je závislé na stupni hydratace. Velikost hydratačního smrštění je za 40 dní cca  $0,2 \text{ mm.m}^{-1}$ .

- **karbonatační smrštění**, kdy z důvodu dlouhodobého působení  $\text{CO}_2$  vzniká karbonatace cementového kamene. Jedná se o letitý proces se smrštěním  $0,0$  až  $1,0 \text{ mm.m}^{-1}$ .

### Vliv tranzitní zóny na pevnost betonu

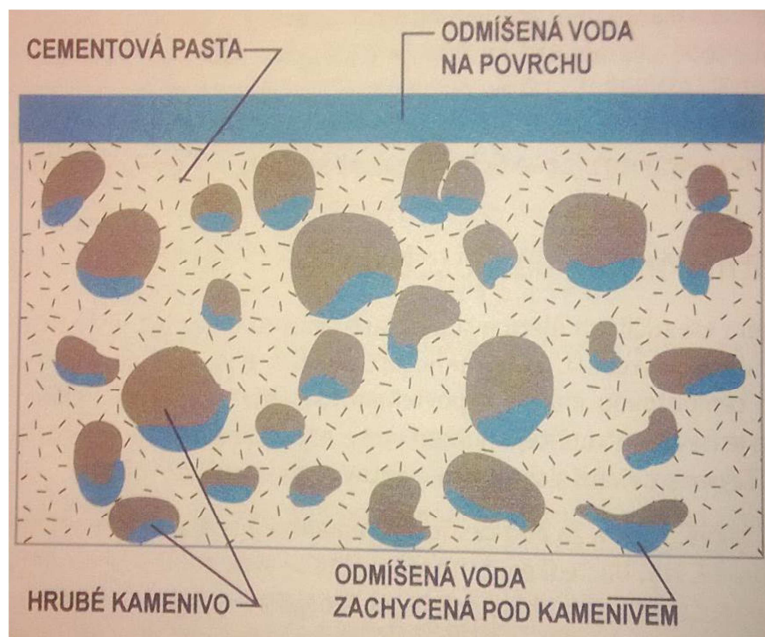
Dlouhou dobu byl beton chápán jako dvoufázový materiál složený ze zatvrdlé cementové pasty a kameniva, jehož vlastnosti byly určovány pouze vodním součinitelem. Později se ale ukázalo, že na rozhraní kameniva a zatvrdlé cementové pasty se nachází tzv. tranzitní zóna, která má zcela jiné vlastnosti než ostatní zatvrdlá cementová pasta. Jedná se především o vyšší pórovitost, nižší pevnost z důvodu vyššího množství poměru  $v/c$  (odměšování vody uvnitř betonu), a rostou zde také velké krystaly portlanditu a dlouhé jehlicové krystaly ettringitu, které způsobují větší pórovitost.



Obr. 6 Schéma tranzitní zóny v betonu [52]

Je to způsobeno tím, že pod zrny kameniva se usazuje několik mikrometrů tenká vrstvička vody a to vytváří podmínky pro lepší růst krystalů. Tloušťka mezifázové tranzitní zóny je cca 30 až 50  $\mu\text{m}$ , může tvořit 30 až 50 % celkového objemu cementové pasty a má tedy značný vliv na konečné vlastnosti betonu. Nacházejí se v ní poměrně malá cementová zrna a duté produkty hydratace. [51]

Ve vysokohodnotném betonu nebyla tranzitní zóna identifikována, neboť jsou zde přítomny křemičité úlety. [7], [52]



Obr. 7 Schéma nadbytečné vody uzavřené pod hrubými zrny kameniva [52]

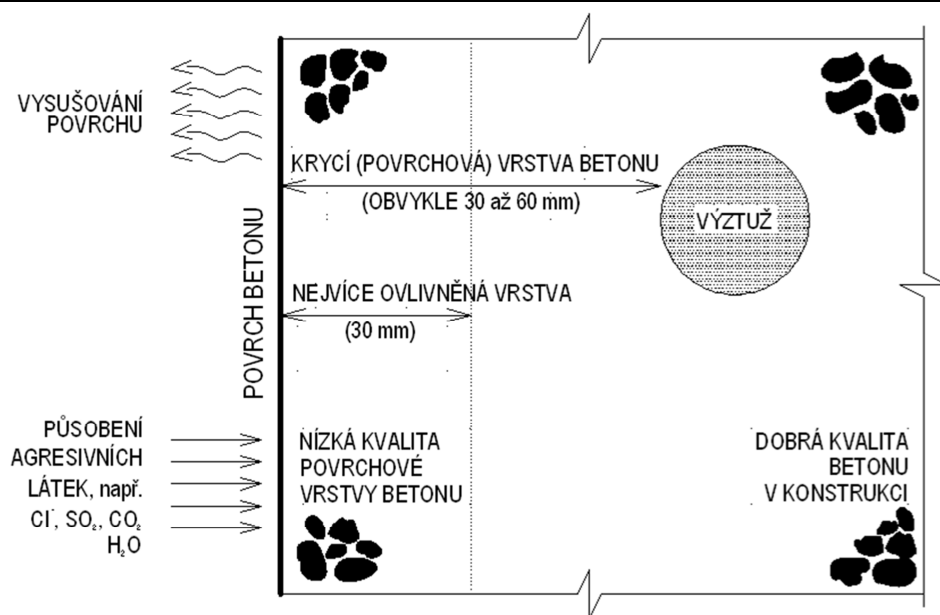
Někteří laici tvrdí, že současné betony jsou méně trvanlivé než starší betony. Toto tvrzení lze vysvětlit různě. První možností je, že do dnešních let vydržely pouze ty pevnější betony, se správným návrhem, provedením, ošetřováním a ukládáním. Druhým aspektem je jemnost mletí betonu dříve používaných a současných betonů. Pro výrobu starších betonů se používal hruběji mletý portlandský slínek s jiným poměrem slínkových minerálů a hydratace probíhala pomaleji, a proto byly po 28 dnech nižší pevnosti (i když s vyšší dávkou cementu), avšak v následujících měsících probíhal další růst pevností. [7]

### 2.1.2 Krycí vrstva betonu

Krycí (povrchovou) vrstvou betonu rozumíme tu část betonu, která vytváří fyzikální a chemickou ochranu výztuže před agresivními vlivy (zejména korozí) a její tloušťka se pochybuje v rozmezí 30 ~ 60 mm.

Je již dlouho známo, že povrchová vrstva nemá stejnou mikrostrukturu jako okolní beton, zejména z důvodu tzv. stěnového efektu (wall effect). Kolem stěn bednění na povrchu betonu není stejné uspořádání velkých zrn kameniva, zejména z hlediska její objemové hmotnosti. Na okrajích je beton bohatší na hydratovanou cementovou pastu. Tento efekt se projevuje zejména u konstrukcí s tloušťkou nad 100 mm, kdy dochází k segregaci zrn kameniva. Eliminace efektu je možná díky propustným formám, kdy dosáhneme nejen zvýšení trvanlivosti, ale i estetického povrchu. [7]

Mimo stěnového efektu jsou hlavními příčinami také segregace, nesprávné umístění betonu, nedostatečné zhutnění, způsob ošetřování a špatné vytvrzení. Přítomnost mikrotrhlin zvyšuje náchylnost k poškození.



Obr. 8 Krycí (povrchová) vrstva betonu [VZ dle 6]

Propustnost povrchové vrstvy, zejména absorpční vlastnosti (propustnost a difuzivita), rozhodujícím způsobem ovlivňuje rychlost karbonatace betonu a tím i snížení alkality betonu v okolí betonářské výztuže. Proto se propustnost betonu povrchové vrstvy jeví jako vhodný parametr, který poukazuje na schopnost betonu odolávat nežádoucím agresivním vlivům, zejména karbonatací.

Zkoušky permeability ukazují na kapilární pórovitost betonu [12].

V zahraničních literaturách se krycí (povrchová) vrstva betonu označuje jako „covercrete“ a poprvé ji takto nazval ve své publikaci J.D. Dewar v roce 1985 (Dewar, J.D., “Improvement in concrete durability”, Proceedings of Thomas Telford Seminar, Institution of Civil Engs., London, May 1985).

## 2.2 Transportní jevy v betonu

Existuje mnoho různých jevů (koroze výztuže, působení síranů, poškození mrazem), které mohou přispět k zhoršení stavu betonové konstrukce. Společnou charakteristikou těchto procesů je transport médií nebo energií do betonu skrz krycí (povrchovou) vrstvu nebo zevnitř. Pokud chceme zvýšit životnost konstrukcí, je důležité mít jasnou představu o různých transportních jevech.

Hlavní cestou, jak agresivní látky vstupují do betonu skrz cementovou matici, je transport difúzi, propustností (vzduchovou nebo vodní), absorpcí (kapilární sorpcí) nebo iontovou migrací, tepelnou nebo elektrickou vodivostí. Jedná se o tzv. fyzikální vlastnosti propustnosti betonu. Neméně důležitý vliv mají i technologické vlastnosti jako vodotěsnost, nasákavost, hydroskopičnost, vztlínavost, vodotěsnost, průvzdušnost. Popisem pohybu médií nebo energií se zabývá permeabilita betonu.

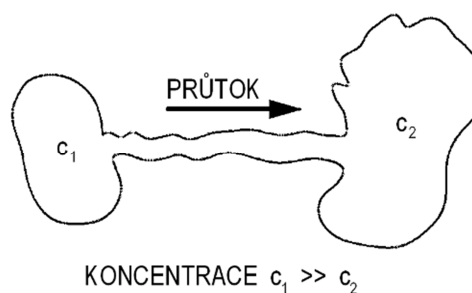
### 2.2.1 Difúze [1], [4]

Difúze je děj, při kterém **se jednotlivé molekuly nebo ionty pohybují** materiálem **koncentračním gradientem**. Makroskopický pohyb nastává jako výsledek malého nahodilého molekulárního pohybu odehrávajícího se v malých vzdálenostech. Difúze je výraznější u plynů. Je-li vedle sebe například silný roztok se slabým, budou mít tyto roztoky tendenci vytvořit jeden roztok o stejné koncentraci v celém jejím objemu.

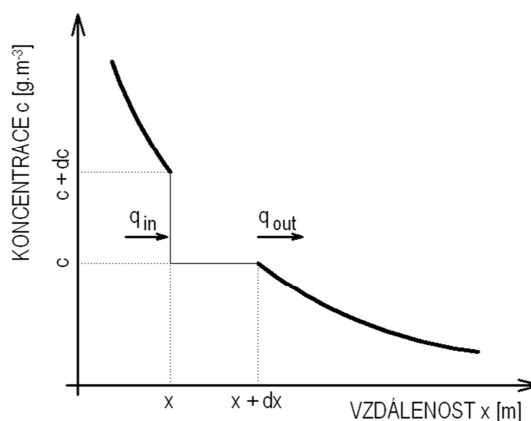
Pro difúzi plynu platí analogie – různé koncentrace vodní páry. Tento mechanismus tedy zajistí transport vody přes póry nenasyčeného betonu. Platí zde Fickův zákon, který je popsán jako poměr přenosu průtoku vody o gradientu koncentrace jednotkou plochy [4]:

$$q = -D \frac{dc}{dx}, \text{ kde} \quad (6)$$

$q$ ...průtok vody procházející vrstvou betonu [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $D$ ...koeficient difúze [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $c$ ...koncentrace [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $x$ ...vzdálenost [ $\text{m}$ ].



Obr. 9 Princip difúze (VZ [1])



Obr. 10 Grafické znázornění difúze (VZ [4])

K difúzi v betonu tedy dojde v případě, že je koncentrace plynu na povrchu a uvnitř materiálu rozdílná, nebo pokud nastane koncentrační gradient. V praxi neustále dochází difúzi vodní páry skrz beton nebo difúzi molekul  $\text{CO}_2$  do betonu.

Vlivem působení difúze vodní páry z a do betonu dochází ke změnám rovnováhy vlhkosti v pórové struktuře betonu, kdy tyto změny ovlivňují rozkladné procesy betonu. Vysoká vlhkost betonu způsobuje pomalejší karbonataci betonu, anebo vyšší vníkaní chloridů. Karbonatace je způsobena difúzí molekul  $\text{CO}_2$  do betonu a při souběžné přítomnosti vzduchu a vody dochází ke korozi betonářské výztuže.

V případě difúze vodní páry je možné koncentraci vypočítat z rozdílných parciálních tlaků nebo relativních vlhkostí.

Kinetická teorie platí i pro ideální plyn a neustálý pohyb molekul v roztoku. Pohyb molekul je sledován měřením změn koncentrací. To se děje volnou energií v ideálním roztoku (elektrochemicky je to stálý roztok) a volná energie molekulárních částic je ekvivalentní jeho chemickému potenciálu  $\mu$  a počítá se ze vztahu [1],[4]:

$$\mu = \mu_0 + R.T.\ln(c), \text{ kde} \quad (7)$$

$\mu_0$  ...standardní chemický potenciál,  $R$ ...ideální plynová konstanta [ $\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ],  $T$ ...teplota [K],  $c$ ...koncentrace částic v roztoku.

Difúzi lze také vyjádřit pomocí součinitele difúze vodní páry, který je pro cementový kámen roven konstantě, tj.  $\delta = 0,010.10^{-9}$  s a je závislý na rozdílu parciálních tlaků na obou stranách měřené látky a na teplotním poli (při poklesu teploty dosáhne tlak vodní páry tlaku nasycení a vodní pára začne v pórovitém cementovém kameni kondenzovat; tak dosáhneme ke zvýšení vlhkosti v cementovém kameni a zvýšení tepelné vodivosti).

### 2.2.1 Propustnost [1]

Propustnost je proces, při kterém kapalina nebo plyn prochází skrz materiál v **důsledku tlakových gradientů** a vyjadřuje rychlost proudění tekutiny do porézního pevného materiálu. Platí D'arcyho zákon [1]:

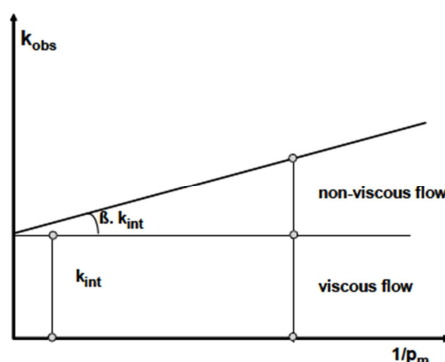
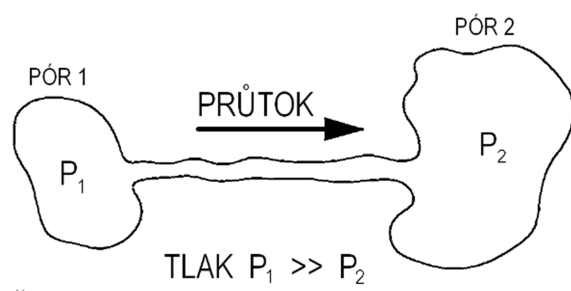
$$\vec{J} = -\frac{k'}{\eta} \text{grad}(P), \text{ kde} \quad (8)$$

$\vec{J}$  ...objemový poměr toku [ $\text{m.s}^{-1}$ ] a je analogický rychlosti,  $k'$ ...koeficient vnitřní permeability [ $\text{m}^2$ ], která závisí na:  $\eta$ ...dynamická viskozita (vazkost) [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ],  $P$  ...tlak ve směru os x, y a z [ $\text{N.mm}^{-2}$ ].

Důležitou roli hraje pórová struktura (délka, tvar a skutečný průřez póru) a viskozita procházejícího média laminárním kapilárním tokem.

Propustnost vyjadřuje **míru snadnosti, s jakou může tekutina** (plyn nebo kapalina) **pronikat póry betonu vlivem přetlaku** (obdobně, difuzivita vyjadřuje schopnost pronikání tekutiny pórovým systémem betonu vlivem koncentračního gradientu). Permeabilita betonu je charakteristikou vnitřní struktury betonu a měla by tedy být nezávislá na vlastnostech tekutiny, avšak praxe dokazuje, že permeabilita betonu pro vodu dosahuje nižších hodnot než pro plyny. Tento rozdíl se vysvětluje bobtnáním nezhydratovaného cementu v betonu. [39]

Při měření permeability se využívá D'arcyho zákona, který však platí za ustáleného proudění, které v případě vodní propustnost můžeme docílit po velmi dlouhé době (řádově měsíce a více), neboť průtok vody zatvrdlým betonem je velmi pomalý a také důležitou roli hraje fyzikálně-chemické působení mezi vodou a cementovým kamenem. Z těchto důvodů se měření vlastní permeability nahrazuje zjišťováním množství vody vtečené nebo vyteklé přes definovanou plochu za určitý časový interval. Při měření vzduchové permeability jsou výsledky měření výrazně ovlivňovány vlhkostí zkoušeného betonu. [39]



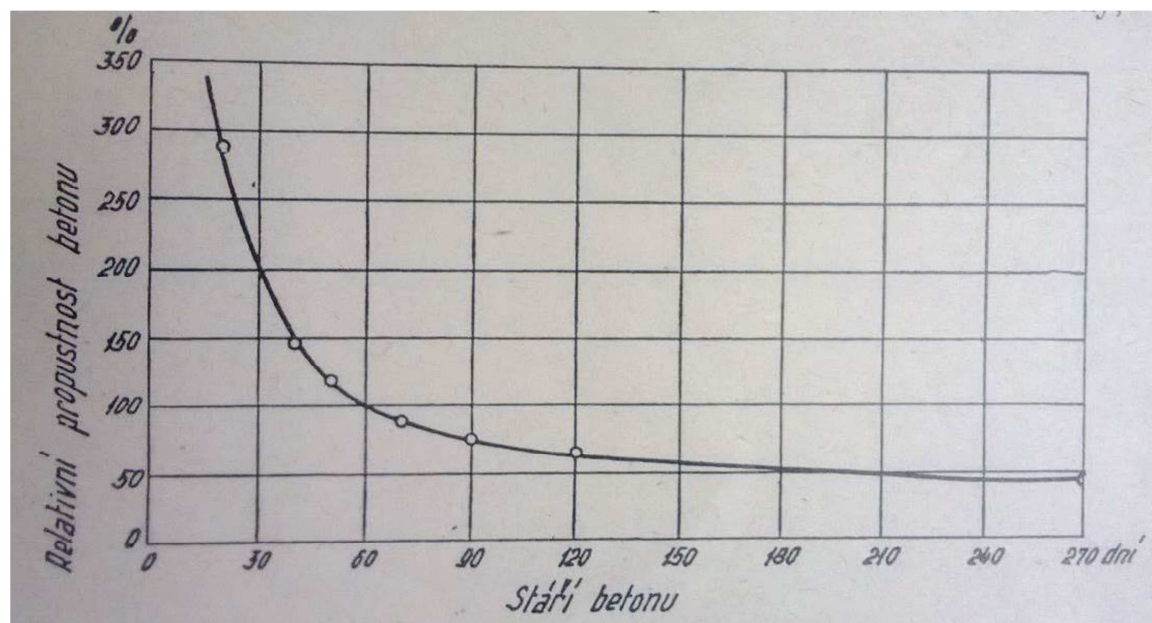
Obr. 11 Princip propustnosti (VZ [1])

Obr. 12 Grafické znázornění propustnosti [1]

Následující tabulka (Tab. 2) porovnává hodnoty propustnosti cementové pasty v průběhu zrání betonu. Obrázek (Obr. 13) znázorňuje vliv stáří betonu na propustnost.

Tab. 2 Vodní propustnost cementové pasty [67]

| Stáří [den]                                 | čerstvý | 5  | 6  | 8 | 13   | 24   | konečný |
|---------------------------------------------|---------|----|----|---|------|------|---------|
| Propustnost $10^{-11}$ [m.s <sup>-1</sup> ] | 200 000 | 40 | 10 | 4 | 0,50 | 0,10 | 0,06    |



Obr. 13 Vliv stáří betonu na jeho propustnost [75]

Tabulka Tab 3. vypovídá o různých propustnostech vybraných kameniv.

Tab. 3 Vodní propustnost kamene [67]

| Kámen                                         | hustý trap | křemenný diorit | mramor | žula   | pískovec |
|-----------------------------------------------|------------|-----------------|--------|--------|----------|
| Propustnost [ $10^{-11}$ cm.s <sup>-1</sup> ] | 24,7       | 82,4            | 0,239  | 0,0535 | 0,00123  |

### 2.2.2.1 Vzduchová propustnost

Vzduchová propustnost je míra průtoku plynů pórovitým materiálem v důsledku tlakových rozdílů a je závislá na otevřené pórovitosti materiálu, jež souvisí se stupněm saturace. Tlak vzduchu v pórech není dostatečně velký pro vytlačení vody z pórů a tak póry zůstanou zaplněné vodou a vzduch jimi nebude moci dále proudit. Z tohoto důvodu je nutné současně měřit i vlhkost betonu. Nemalý vliv má i propojenost pórů, tortuozita (křivolakost) a izotropie pórové struktury. [51]

Propustnost pro plyny je jeden z hlavních parametrů ukazujících na odolnost betonu proti několika druhům degradace. Přítomnost jemných částic, relativní objem cementové matrice, množství vody a vodní součinitel mají největší vliv na propustnost betonu pro plyny. [51]

Většina přesných metod pro měření vzduchové permeability je aplikována měřením tlakového spádu skrz beton a měření rychlosti toku v podmínkách ustáleného stavu. Koeficient vzduchové permeability lze vyjádřit z rovnice [2]:

$$k_g = \eta \frac{Q.L.2p}{t.A.(p_1 - p_2).(p_1 + p_2)}, \text{ kde} \quad (9)$$

$k_g$ ...koeficient vzduchové permeability [ $\text{m}^2$ ],  $Q$ ...objem procházejícího plynu [ $\text{m}^3$ ],  $\eta$ ...viskozita plynu [ $\text{N.s.m}^{-2}$ ],  $L$ ...tloušťka materiálu [ $\text{m}$ ],  $t$ ...čas [ $\text{s}$ ],  $A$ ...zkušební plocha [ $\text{m}^2$ ],  $p$ ...tlakový spád ( $p_1$ ...vstupní,  $p_2$ ...výstupní tlak) [ $\text{N.mm}^{-2}$ ].

Rovnice je platná pro laminární proudění vzduchu. Transport plynu skrz pórový systém není vždy dle výše uvedeného předpokladu, tento předpoklad očekává široký rozsah velikosti pórů.

U mnoha metod měřících vzduchovou propustnost se setkáváme s pojmem **vakuum**, které označuje prostor, v němž je tlak plynu výrazně nižší než normální atmosférický tlak okolí. Níže je uvedena hrubá klasifikace tlaků podle hodnot. [67]

Tab. 4 Informativní klasifikace tlaků [67]

| Stupeň vakua                                               | Rozsah tlaků<br>[Pa]    | Stupeň vakua      | Rozsah tlaků<br>[Pa]    |
|------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| Dokonalé vakuum (absolutně prázdný prostor, teor. situace) | 0                       | Atmosférický tlak | $101,25 \cdot 10^3$     |
| Extrémně vysoké vakuum                                     | $< 10^{-10}$            | Zvýšený tlak      | do $\sim 3 \cdot 10^6$  |
| Ultravysoké vakuum                                         | $10^{-10} \sim 10^{-7}$ | Vysoký tlak       | do $\sim 4 \cdot 10^7$  |
| Vysoké vakuum                                              | $10^{-7} \sim 10^{-2}$  | Velmi vysoký tlak | do $\sim 5 \cdot 10^8$  |
| Nízké vakuum                                               | $10^{-1} \sim 10^2$     | Ultravysoký tlak  | nad $\sim 5 \cdot 10^8$ |

### 2.2.2.2 Vodní propustnost

V kontrastu s plyny můžeme kapaliny považovat za nestlačitelné tekutiny. Jestliže je brána v úvahu viskozita kapalin a ustálený laminární tok skrz strukturu betonu, pak koeficient vodní propustnosti je roven [2], [4]:

$$k_w = \frac{Q \cdot L \cdot \eta}{t \cdot A \cdot \Delta h}, \text{ kde} \quad (10)$$

$k_w$ ...koeficient vodní permeability [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $Q$ ...objem procházející kapaliny [ $\text{m}^3$ ],  $L$ ...tloušťka materiálu [ $\text{m}$ ],  $\eta$ ...viskozita plynu [ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  $t$ ...čas [ $\text{s}$ ],  $A$ ...zkušební plocha [ $\text{m}^2$ ],  $\Delta h$ ...tlakový spád (výška vody) [ $\text{m}$ ].

Dosažení režimu ustáleného toku při malých tlakových gradientech trvá v betonech velice dlouho. Nevýhodou těchto měření je mimo časové náročnosti skutečnost, že u nezhydratovaného cementu dojde během zkoušky k hydrataci, což ovlivní mikrostrukturu betonu a sníží koeficient vodní propustnosti. Z tohoto důvodu se přistupuje ke zkoušení betonu bez ustáleného stavu na nesaturovaných vzorcích, kdy část proniknuté vody je absorbována kapilárními silami. [51]

### 2.2.2.3 Faktory ovlivňující propustnost [10]

Propustnost betonu je částečně způsobena jeho mikrostrukturou, jež je velmi složitá a skládá se z různých fází s různými vlastnostmi. Vnikání tekutin do betonu dochází prostřednictvím sítě nepřerušovaných pórů, které se vytváří v cementové matrici a mezi zrny kameniva. Pokud obsah vody v betonu (tj. poměr v/c a způsob ošetřování) bude udržován na nízké úrovni, sníží se i počet kapilárních pórů a tím i propustnost betonu, tlakový průtok i difúze. Tlakový průtok však zhoršuje mrazuvzdornost (v kombinaci s kapilárním sáním) a šíření je klíčovým mechanismem v oblasti posílení koroze karbonatací nebo pronikání chloridů. Toto je jen část faktorů, které se navzájem ovlivňují. Takhle bychom mohli pokračovat dále, protože téměř každý faktor v níže uveden schématu do určité míry ovlivňuje každý parametr a zkoumání každého z nich odhalí metody, jež poskytují možnost využití zlepšení jejich vlastností.

### 2.2.2 Absorpce, kapilární sorpce a sorptivita [4, 10]

Absorpce je děj, při kterém kapalina proniká do otevřených pórů bez tlaku (hlavní rozdíl oproti propustnosti) a má snahu je vyplňovat. V důsledku toho dochází k zvyšování hmotnosti pórového tělesa.

Při krátkém kontaktu kapaliny se zkušebním tělesem je rychlost absorpce a uváděna jako **počáteční absorpce**, tj. množství vody vsáknuté na definované ploše:



$$a = \frac{\Delta m}{A \cdot f(t^n)} \left[ g / m^2 \cdot s^n \right], \text{ kde} \quad (11)$$

$\Delta m$ ...vsáknuté množství vody [g],  $A$ ...zkušební plocha [ $m^2$ ],  $f(t^n)$ ...funkce času (většinou  $f(t)=\sqrt{t}$ ,  $n=1/2$ ).

Povrchovou nasákavost specifikují britské standardy BS 1881-208:1996 a BS 1881-122:1983, které jsou zaměřené na zkušební metodu ISAT.

**Sorptivita**  $s$  je množství absorbované vody (pohltivost  $i$ , tj. množství pohlcené vody plochu [ $g/mm^2$ ]) skrz materiál definovanou plochou a druhou odmocninou času  $t$  [min].

$$s = \frac{i}{\sqrt{t}} \left[ g / mm^2 / min^{0,5} \right], \text{ kde} \quad (12)$$

Zkoušku standardizuje zahraniční norma ASTM C 1585, která byla vytvořena zejména na základě výzkumu Hootona a Desouza (1996), dále Diase (2004), a v neposlední řadě Ferrari a Stutzman (2006).

Kapilární vztlínání se projevuje u tělesa částečně ponořeného do kapaliny, kdy vlivem kapilárních a sorpčních sil dojde ke stoupnutí hladiny soustavou kapilárních kanálků v betonové hmotě. Výška, do které kapalina vztlíná, je funkcí povahy kapilár (tvar, průřez a propojenost), povrchového napětí, rychlosti odpařování do ovzduší a doby, po kterou je hmota částečně ponořena. Čím je kapilára menší, tím voda vystoupí do větší výšky. Kvalitním zhutněním a provzdušněním betonu výrazným způsobem snížíme výšku vztlínání, neboť přerušíme soustavu souvislých kapilár. Betony s vyššími pevnostmi mají i jemnější pórovou strukturu, kapiláry jsou jemnější a propustnost je nižší.

Tok vody kapilárním sáním může být dle D'arcyho modifikovaného zákona zapsán:

$$f = -\frac{k_p}{\eta} \frac{dp_w}{dx} \left[ kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \right], \text{ kde} \quad (13)$$

$k_p$ ...koeficient vlhkostní propustnosti [ $kg \cdot m^{-1}$ ],  $dp_w/dx$ ...tlakový spád vody v pórech [ $N/m^2$ ],  $\eta$ ...viskozita plynu [ $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ].

Výšku vztlínání lze vypočítat dle vztahu [12]:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma_p \cdot \cos \psi}{r \cdot \rho_v \cdot g} = konst. \cdot \left( \frac{1}{r} \right) [m], \text{ kde} \quad (14)$$

$r$ ...poloměr kapiláry [m],  $\sigma_v$ ...povrchové napětí [ $N \cdot mm^{-2}$ ],  $\psi$ ...úhel smáčení [-],  $h$ ...výška vztlínání [m],  $\rho_v$ ...objemová hmotnost vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ],  $g$ ...zemská přitažlivost = 9,81 [ $m \cdot s^{-2}$ ].

Kapilární vztlínavost je definována ČSN 73 1357-2 a ČSN EN 12 390-8.

S kapilární vztlakovostí se nejčastěji setkáváme při posuzování pronikání zemní vlhkosti do konstrukcí, zejména zdí, ale také i při působení náporových vod na částečně ponořené konstrukce. Obecně existují dvě možnosti:

- Beton není v trvalém kontaktu s vodou a nejedná se o trvalý režim. Jedná se o betony, které jsou vystaveny dešti.

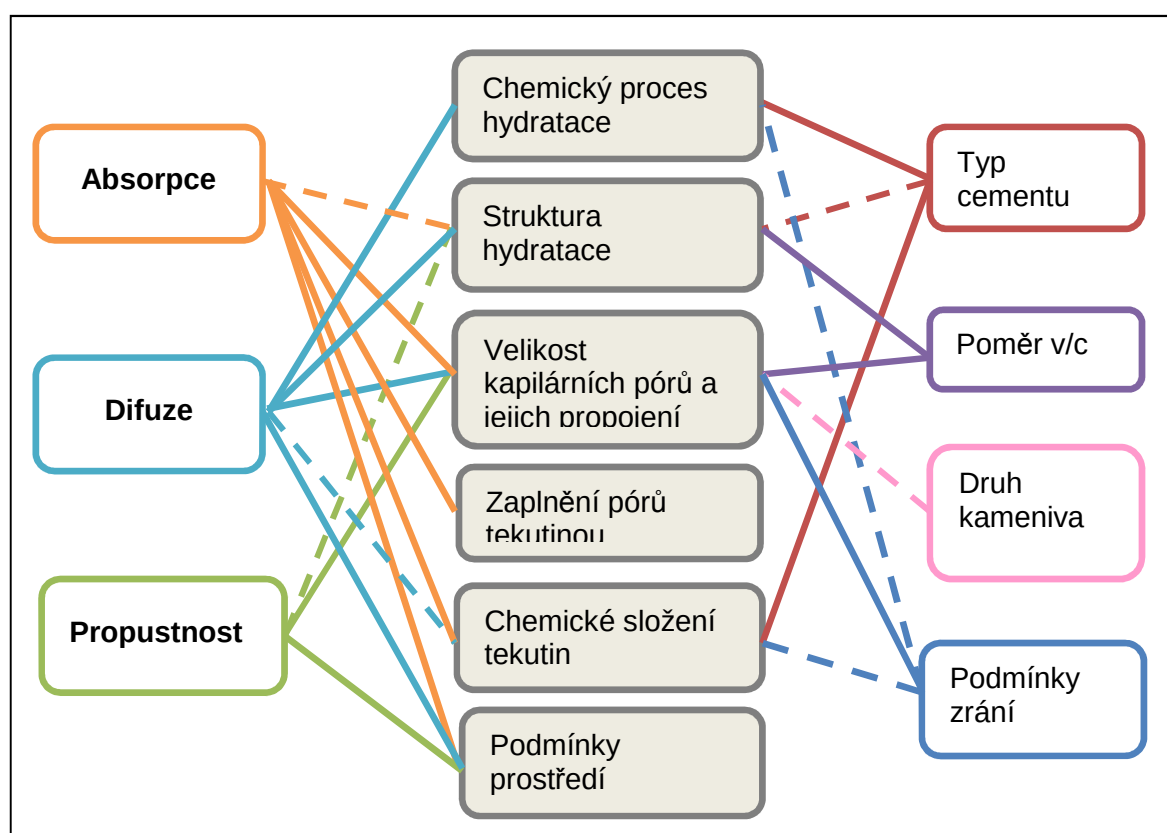
- Beton je v trvalém styku s vodou dlouhou dobu a je tak dosaženo stálého režimu. Jedná se především o případy, kdy je betonová konstrukce na jedné straně ponořena do vody a na druhé straně se může odpařovat.

Propustnost zatvrdělého betonu závisí zejména na kapilární pórovitosti, neboť odolnost proti protékání kapilárními dutinami je mnohem menší než přes cementový kámen.

Betony s dobrou kvalitou mají kapilární pórovitost 30 až 40 % a je 20 až 100 krát propustnější než samostatný cementový kámen.

Absorbovaná voda velmi často obsahuje i agresivní látky, např. chloridy, a v tomto případě hraje kapilarita velmi významnou roli při pronikání látek do struktury betonu.

Následující obrázek ukazuje, co ovlivňuje difuzi, propustnost a absorpci, a jaké vstupní parametry mají vliv na ovlivnění základních vlastností.



Obr. 14 Schéma závislostí transportních jevů na vlastnostech betonu

### 2.2.3 Adsorbce [12]

Adsorbce (hygroskopičnost) je proces, při kterém molekuly přilnou k vnitřnímu povrchu betonu. To může být buď fyzikálními silami adheze, nebo v důsledku chemických vazeb. Vyjadřuje schopnost adsorbovat na svém povrchu (v pórech) vzdušnou vlhkost. Cementový kámen adsorbuje vzdušnou vlhkost do pórů dle výše relativní vlhkosti vzduchu a velikosti vnitřního povrchu kapilár. Tloušťka adsorbované vrstvy vody  $\delta_v$  se vypočítá následovně [12]:

$$\delta_v = \frac{0,3656}{\sqrt{-\ln \varphi}} [10^{-9} m], \text{ kde} \quad (15)$$

$\varphi$ ...relativní vlhkost vzduchu [-], meze 0,3 až 1,7 mm.

Zvýšené množství adsorbované vody umožňuje pokračování v hydrataci cementu s následným nárůstem pevností cementového kamene, avšak případné kolísání vlhkosti způsobuje objemové změny (reversibilní smrštění) [12].

Je nezbytné rozlišovat mezi absorbcí a adsorbí [4]. Termín **absorbce** popisuje procesy čerpající vodu do betonu, např. kapilární sorpce, osmóza, atd. Pojem adsorbce zahrnuje všechny procesy, které na se mohou vázat ion (dočasně či trvale) na povrchu betonu a zabránit tak jejímu pohybu. Tyto procesy mohou být chemické reakce nebo fyzikální působení. **Desorbce** je uvolňování adsorbovaných molekul z povrchu betonu. Hlavními parametry adsorpce a desorpce jsou koncentrace molekul plynů nebo vody  $c$  a teplota  $T$ .

### 2.2.4 Nasákavost [12] [75]

Nasákavost vyjadřuje schopnost nasytit vodou otevřené póry cementového kamene (popř. kamenných součástí) za definovaných podmínek definovaných zkušebním postupem v závislosti na době ponoření při malém hydrostatickém tlaku a působení kapilárních sil. Nasákavost je specifikována normou ČSN 73 1357-2.

Ponoříme-li beton do vody, voda se kapilárně nasaje ze všech stran do betonu tak, že z něj vzduch nemůže volně unikát a je vodou stlačován. Čím jsou kapiláry menší, tak je tlak větší (viz. následující tabulka). [75][75]

Tab. 5 Závislost tlaku vzduchu v kapilárách [75]

| Poloměr kapiláry $r$ [mm]       | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 | 0,0001 | 0,00001 |
|---------------------------------|---|-----|------|-------|--------|---------|
| Tlak $p$ [kg.cm <sup>-2</sup> ] | 1 | ~ 1 | 1,13 | 2,33  | 15,6   | 147     |

Při ponoření betonu do vody v něm vznikají různé stavy, poněvadž jsou kapiláry různých a proměnlivých průměrů vzájemně spojeny. Větším tlakem vzduchu v malých kapilárách se vypuzuje vzduch z širokých kapilár a z ponořeného tělesa vystupují bublinky vzduchu na

koncích širších kapilár (uzavřený vzduch zadržuje vnikání vody a proto se doporučuje před zkouškami nasákavosti vzduch odsát). Vypuzování vzduchu a kapilární vnikání vody trvá za normálních podmínek velmi dlouho, i když není beton zcela ponořen, takže je zachována možnost úniku vzduchu částí betonu, který není ponořen. [75]

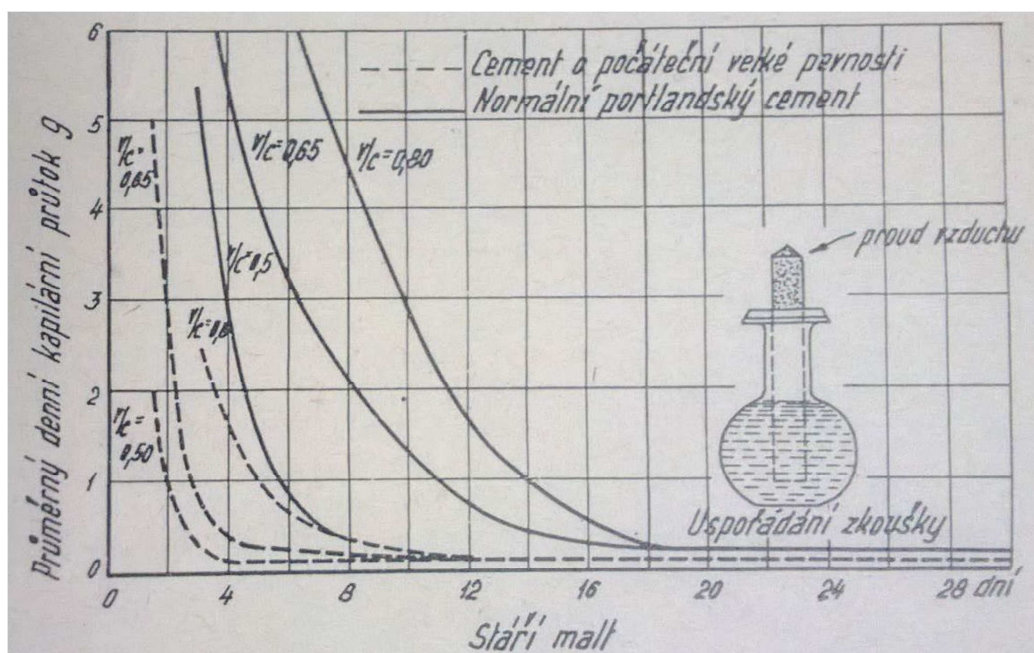
Z výsledků této zkoušky je možno usuzovat zejména na působení vody při mrazu a působení vody přímým stykem s povrchem betonového tělesa určitého objemu.

$$N = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100 [\%] \quad (16)$$

, kde

$m_s$ ...hmotnost nasyceného vzorku [g],  $m_d$ ...hmotnost suchého vzorku [g].

Voda může pronikat do betonu i tehdy, není-li pod hydrostatickým tlakem. Intenzita jevu je dána vlastností kapilár, na něž působí vlastnosti cementu i kameniva, množstvím vody, způsobem zhutnění a podmínkami tvrdnutí (jako u pórovitosti a propustnosti betonu Obr. 16). Velmi nepříznivě působí na nasákavost malt vysoký vodní součinitel, neboť jsou málo odolné střídání mrazu a při přítomnosti agresivních látek ve vodě. [75]



Obr. 15 Vliv cementu a poměru v/c na kapilární nasákavost malt [75]

**Povrchová nasákavost** je schopnost látky povrchově nasáknout vodu a je specifikována ČSN 73 1357-2, BS 1881-208:1996 a BS 1881-122:1983

**Navlhavost a vysýchavost** [1] - navlhavost popisuje chování materiálu na vzduchu s vlivem působení atmosférické vlhkosti. Opakem navlhavosti je vysýchavost.

### 2.2.5 Vodotěsnost [12]

Vodotěsnost betonu definuje hloubka průsaku tlakovou vodou dle ISO 7031, ČSN-EN 206 a podle ČSN EN 12 390-8 a jsou pro ni rozhodující otevřené kapilární póry o velikosti  $> 10^{-7}$  m při působení tlakového gradientu (menší jsou neprůchozí). Čím nižší množství makrokapilár bude obsaženo v betonu, tím vyšší vodotěsnosti docílíme. Při výrobě betonu lze ovlivnit vodotěsnost následovně [12]:

- nízký poměr  $v/c \leq 0,4$ , dokonalé zhutnění ČB, kvalitní ošetřování – tyto charakteristiky mají vliv na hutnost a podíl cementového kamene,
- hydrofobní přísady nebo příměsi polymerů,
- povrchovou úpravou.

Lze ji vyjádřit součinitelem propustnosti (permeability)  $k_p$  [12]:

$$k_p = \frac{V_v}{3600 \cdot S \cdot t \cdot \Delta p} \left[ m \cdot s^{-1} \right], \text{ kde} \quad (17)$$

$V_v$ ...objem vody [ $m^3$ ], který projde plochou  $S$  [ $m^2$ ] za definovaný čas  $t$  [h] při tlakovém gradientu  $\Delta p = 10^5$  Pa,  $h$ ...tloušťka vzorku  $h = 200$  mm.

Na hodnotu součinitele propustnosti má významný vliv stáří betonu (Tab. 6), neboť v průběhu zrání betonu se kapiláry zaplňují slinovými minerály a vodotěsnost vzrůstá.

Tab. 6 Vliv stáří betonu na hodnotě součinitele propustnosti  $k_p$  [12].

| Stáří betonu   | Součinitel propustnosti $k_p$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] |
|----------------|----------------------------------------------------|
| Čerstvý betonu | $2 \cdot 10^{-6}$                                  |
| 7 dní          | $10^{-11}$                                         |
| 28 dní         | $10^{-12}$                                         |
| 180 dní        | $10^{-13}$                                         |

### 2.2.6 Elektrická vodivost betonu - migrace iontů [4], [12], [39]

Elektrická vodivost je závislá na vlhkosti, koncentraci roztoku v pórech (alkálie,  $Ca(OH)_2$ ,...), a při zvýšené hodnotě těchto parametrů prudce klesá. Důležité je mít na paměti, že elektrický odpor cementového kamene je výrazně vyšší než vodivost kameniva. Elektrický odpor vysušeného cementového kamene má hodnotu cca  $10^7 \Omega \cdot m$ .

Elektrická vodivost betonu je velmi nízká, ale výrazně narůstá s objemem vody v betonu. Pórovitý a vodou nasáklý beton má výrazně nižší odpor než beton suchý. Elektrický proud prochází betonem jako elektrolytem v důsledku různě fyzikálně a chemicky vázané vody, jež je obsažena ve složitém pórovém systému betonu. Mezi elektrickou vodivostí (resp. elektrickým odporem) a propustností betonu pro vodu a plyny existuje velmi úzký vztah. Pórovitý beton je nejen elektricky vodivější, ale také jím proniká více vlhkosti, kyslíku,  $CO_2$  a

dalších nežádoucích médií způsobujících vznik koroze výztuže. Je prakticky prokázáno, že pokud je hodnota měrného elektrického odporu betonu vyšší než 5 až 7  $\Omega \cdot m$ , výztuž v betonu je spolehlivě pasivována. Měření vodivosti betonu se provádí semidestruktivně v povrchové hloubce betonu do 25 mm pomocí 4 elektrod pod elektrickým proudem a měří se elektrické napětí mezi jednotlivými elektrodami.

Elektromigrace nastane při přítomnosti různého napětí. To může být zajištěno z externího zdroje (únik stejnosměrného napájení) nebo je často způsobeno elektrickým potenciálem důlkové koroze na betonářské oceli. Elektromigraci lze měřit z elektrického odporu betonu, protože je to mechanismus, který konkrétně může vést elektřinu.

Migrace iontů je transport iontů v elektrolytu v důsledku působení sil v elektrickém poli. V elektrickém poli jsou kladné ionty přesouvány přednostně k záporným elektrodám a záporné ionty ke kladným elektrodám. Migrace vytváří rozdíl v koncentracích homogenních látek nebo podmiňuje tok koncentračním gradientem. Obecně platí Ernest-Planckův zákon, který se skládá ze 3 částí: Tok = difúze + migrace + proudění.

$$J = D \frac{dC}{dx} + \frac{ZF}{RT} DC \frac{dF}{dx} + CV_e \left[ g / m^2 \cdot s \right], \text{ kde} \quad (18)$$

$D$ ...koeficient difúze [ $g/m^2 \cdot s$ ],  $C$ ...koncentrace [ $g/m^3$ ],  $x$ ...vzdálenost [ $m$ ],  $Z$ ...elektrický náboj,  $F$ .....Faradayova konstanta [ $J/mol \cdot K$ ],  $R$ ...plynová konstanta [ $J/mol \cdot K$ ],  $T$ ...teplota [ $K$ ],  $E$ .....elektrický potenciál [ $V$ ],  $V_e$ .....rychlost toku [ $m/s$ ].

## 2.2.7 Tepelná vodivost [12]

**Tepelná vodivost** je závislá na krystalické struktuře, objemové hmotnosti, pórovitosti a vlhkosti cementového kamene, kdy uzavřené a jemné póry tepelnou vodivost snižují. Vyjadřuje se součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ].

Čím je uzavřená pórovitost vyšší, tím dosáhneme nižšího součinitele tepelné vodivosti a také čím nižší je objemová hmotnost, tím nižší jsou pevnosti i hodnota součinitele tepelné vodivosti. Zvýší-li se vlhkost, zvýší se také hodnota tepelné vodivosti. Zvýší-li se teplota, sníží se hodnota součinitele  $\lambda$ .

**Teplotní gradient** způsobuje pohyb vody od horkých oblastí k oblastem chladným. Rychlost přenosu závisí na propustnosti betonu. Tento proces je nezávislý a jedná se o dodatek k sušení (odpařování), která proběhne na horkých nezakrytých plochách. Stejně tak i u nasycených betonů funguje pohyb iontů (molekul), které se budou pohybovat směrem k chladnějším oblastem.

Hodnota tepelné vodivosti prostého betonu je cca 1,28 až 1,54  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  a železo- betonu 1,63 až 1,72  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

### **2.2.8 Mrazuvzdornost**

Mrazuvzdorností se rozumí schopnost betonu ve vodou nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování. Chemicky vázaná voda v betonu nikdy nezmrzne, gelová voda zmrzne až při cca  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kapilární voda zmrzne již při  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , neboť v kapilárách je přítomný roztok. Tvorba ledu závisí na velikosti kapilár a postupuje z povrchu směrech do středu betonu.

Zkoušku mrazuvzdornosti popisuje norma ČSN 73 1322 „Stanovení mrazuvzdornosti betonu“ 1968, Z1 2003 a provádí se na betonových hranolech o rozměrech  $100\times 100\times 400\text{ mm}$ . Hranoly nasycené čistou vodou jsou vystaveny 50, 100 nebo 150 zmrazovacím cyklům. Jeden cyklus se sestává ze 4 h zmrazování na teplotu  $-15$  až  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a 2 h rozmrazování vodou při teplotě  $+15$  až  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **2.2.9 Transport iontů**

Degradace betonových konstrukcí bývá velmi často způsobena působením kombinací několika látek (voda, kyslík, ...) a iontů (chloridy, sulfáty, ..) na pórovou strukturu betonu. Bylo dokázáno, že na pronikání chloridových iontů má vliv velká řada parametrů, zejména transport kapalné vody, pohyb iontů v roztoku, lokální koncentrace iontů elektrolytického roztoku, a dále také fyzikální a chemické interakce iontů a pevných fází materiálů. V cementové matici se mohou ionty vyskytovat buď volně v roztoku, nebo vázané na pevnou fázi (velmi minoritně). Protože ionty nemohou existovat samostatně, musí být přítomny i jiné ionty. U chloridů se jedná o přítomnost např.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , ..., které mají nižší difúzní rychlost než ionty  $\text{Cl}^-$ . Při pohybu ionty chloridu se mezi ionty chloridu a ostatními pomalejšími kationy vytváří elektrické pole opačné polarity. Kombinace vratné síly (elektrické pole opačné polarity) a hnací síly (elektrický potenciál) označujeme jako elektrochemický potenciál.

### **2.2.10 Penetrabilita**

Pojem penetrabilita zahrnuje všechny vlivy pronikající do betonu skrz povrchovou vrstvu. Jedná se zejména o vzduchovou propustnost, vodní propustnost a sorptivitu, migraci iontů a elektrický odpor.

Vzhledem k velkému objemu metod měřících penetrabilitu a vzhledem k praktické části zaměřené na propustnost, jsou v dalších kapitolách popsány pouze metody vodní a vzduchové propustnosti a sorptivity.

## 2.3 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ PROPUSTNOSTI A SORPTIVITY

Měřících zařízení pro stanovení odolnosti proti průniku vody a vzduchu do betonu je velmi mnoho a každé z nich má jinou metodiku měření. Způsoby hodnocení dle interních předpisů nebo mezinárodních norem jsou uvedeny v následujících publikacích:

- německá norma DIN 1048, part 5 (1991) [53], DIN 52617
- rakouská norma B 3303 (vodní propustnost s tlakem 7 bar)
- švýcarská norma SIA 262/1-E: 2003
- britská norma BS 1881-208:1996 [16]
- čínská norma GBJ 82-85 [54]
- nizozemská norma NEN EN 12390-8 [55]
- americký výbor ACI 228.2R- 98 [57]
- ISO 7031:1988
- mezinárodní výbor RILEM CPC 11.2
- evropský výbor CEN/TC 104/SCI/TG8:184 Standards.

Neexistuje žádná literatura, která by kompletně uváděla informace o všech dostupných metodách, včetně jejich podrobného popisu, metodiky měření, vyhodnocení dat a srovnání s ostatními metodami. I když jsou některé zařízení komerčně dostupné, výrobci zařízení podrobné informace ani nezveřejňují nebo popis metody není dostupný. Několik málo metod je i standardizováno. Přehled metod, o kterých autorka našla bližší informace, je uveden v tabulkách 7 - 10. Informace jsou uváděny pokud možno ze základních zdrojů, norem nebo článků. Nejsou zde uváděny klasické testy sorptivity, ale jedná se o přehled přístrojů k měření určité veličiny.



Tab. 7 Zkušební zařízení pro měření propustnosti vzduchu I.

| Zkušební metoda /<br>zařízení                          | Problémy<br>srovnávací testy? | Komerční dostupnost | Min. dostupných<br>informací? | Norma / standard /<br>operační postup | Použití   |         | Náročnost<br>[min] | Typ: P-povrchová,<br>I-podpovrchová | Výhody:                                                                                    | Nevýhody:                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        |                               |                     |                               |                                       | Laborator | In-situ |                    |                                     |                                                                                            |                                                                                                                  |
| Vzduchová propustnost I.                               |                               |                     |                               |                                       |           |         |                    |                                     |                                                                                            |                                                                                                                  |
| Autoclam Permeability<br>System                        | ano                           | ano                 | -                             | -                                     | ano       | ano     | 30                 | P                                   | b)<br>Grafické znázornění.                                                                 |                                                                                                                  |
| APNS (Air Permeability of<br>Near Surface)             | -                             | ne                  | ano                           | -                                     | -         | -       | -                  | -                                   | -                                                                                          | Málo dostupných informací o<br>zařízení.                                                                         |
| Cembureau (s kyslíkem)                                 | -                             | -                   | ano                           | -                                     | ano       | ne      | několik<br>hodin   | P                                   | c) OPI test.<br>Preferována RILEM.                                                         | Málo dostupných informací o<br>zařízení.                                                                         |
| Figg Test                                              | -                             | -                   | ano                           | -                                     | ano       | ano     |                    | I                                   | Levná, jednoduchá. Měření<br>není ovlivněno<br>povrchovými vrstvami nebo<br>povlaky.<br>a) | 1)<br>3) o 5 kPa<br>Velký rozptyl výsledků, proto<br>upravena na CAT.<br>Měření je citlivé na druhu<br>kameniva. |
| Figg Test upravený -<br>Poroscope Plus                 | -                             | ano                 | ne                            | -                                     |           |         |                    | I                                   | b)                                                                                         | 1)                                                                                                               |
| GGT(s CO <sub>2</sub> )                                | -                             | ano                 | ano                           | -                                     | ano       | ano     | 40                 | I                                   | Zkoušky je možné<br>provádět za různých tlaků.                                             | 2) 2 otvory                                                                                                      |
| Hong-Parrott<br>(The Parrott Permeability<br>Test Kit) | ano                           | ano                 |                               | -                                     | ano       | ano     | 60 až<br>1 den     | I                                   | Při opakovaném měření na<br>stejném otvoru dosáhneme<br>v podstatě stejných<br>výsledků.   | 1)                                                                                                               |

Pozn. Informace není dostupná, neuvedená, není známo = -

Tab. 8 Zkušební zařízení pro měření propustnosti vzduchu II.

| Zkušební metoda /<br>zařízení        | Problémy<br>srovnávací testy? | Komerční dostupnost | Mín. dostupných<br>informací? | Norma / standard /<br>operační postup | Použití   |         | Délka testu<br>[min] | Typ: P-povrchová,<br>I-podpovrchová | Výhody:                                                                                          | Nevýhody:                                                                       |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                      |                               |                     |                               |                                       | Laborator | In-situ |                      |                                     |                                                                                                  |                                                                                 |
| Vzduchová propustnost II.            |                               |                     |                               |                                       |           |         |                      |                                     |                                                                                                  |                                                                                 |
| OPI test (Oxygen permeability index) | -                             | ne                  | ano                           | -                                     | ano       | ne      | -                    | P                                   | c) Cembureau test                                                                                | 7 dní před zkouškou je nutné<br>zk. vzorek uložit do sušící<br>komory při 50°C. |
| Paulmann                             | -                             | ne                  | ano                           | -                                     | ano       | ano     | -                    | I                                   | Přetlak 2 bar vytvořen<br>dusíkem nebo vzduchem                                                  | 1)                                                                              |
| SAF (Surface Air Flow)               | -                             | ne                  | ano                           | -                                     | ano       | ano     | -                    | P                                   | a)                                                                                               | 3) Pouze pro měření kvality<br>povrchu betonu, 5)                               |
| Schönlín                             | -                             | ne                  | -                             | -                                     | ano       | ano     | 20                   | P                                   | a)                                                                                               | 3) 5)                                                                           |
| TPT (Torrent Permeability Tester)    | ano                           | ano                 | ne                            | ano                                   | ano       | ano     | 15                   | P                                   | Digitální, jednoduchá<br>obsluha.                                                                | 4)                                                                              |
| Permea-TORR                          | -                             | ano                 | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 10                   | P                                   | Vychází z TPT, ale je<br>rychlejší, přesnější,<br>automatická kalibrace.<br>6 tříd propustnosti. | 4)                                                                              |
| TUD                                  | -                             | ne                  | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 60                   | I                                   |                                                                                                  | 1)                                                                              |
| Zia-Guth                             | -                             | ne                  | ne                            | -                                     | ano       | -       | 120                  | P                                   | Z grafu je možné přiřadit<br>koeficient permeability $k$<br>[m <sup>2</sup> ].                   | Časově náročná.                                                                 |

Pozn. Informace není dostupná, neuvedená, není známo = -

Pozn. Informace není dostupná, neuvedená, není známo = -

Tab. 9 Zkušební zařízení pro měření absorpce I.

| Zkušební metoda /<br>zařízení                               | Problémy<br>srovnávací testy? | Komerční dostupnost | Min. dostupných<br>informací? | Norma / standard / operační<br>postup | Použití   |         | Délka<br>[min] | Typ: P-povrchová,<br>I-podpovrchová | Výhody:                                                                                                          | Nevýhody:                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|----------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                             |                               |                     |                               |                                       | Laborator | In-situ |                |                                     |                                                                                                                  |                                                                                                                                                    |
| Sorpitivita (absorpce)                                      |                               |                     |                               |                                       |           |         |                |                                     |                                                                                                                  |                                                                                                                                                    |
| Autoclam Permeability<br>System                             | ano                           | ano                 | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 60             | P                                   | Předchůdce CLAMu<br>b)                                                                                           | neuváděno                                                                                                                                          |
| CLAM                                                        | -                             | -                   | ano                           | -                                     | ano       | ano     | 30             | P                                   | Nutnost měření to ku pod<br>stálým tlakem.                                                                       | 3) 4)<br>Časově náročná zkouška.                                                                                                                   |
| Figg Test                                                   | -                             | -                   | ano                           | -                                     | ano       | ano     | 40             | I                                   | Není ovlivněna povlaky a<br>povrchovými vrstvami<br>betonu.<br>d)                                                | 2) může zkoušku ovlivnit.<br>4)<br>Velký rozptyl výsledků, proto<br>upravena na CAT.                                                               |
| Figg Test upravený –<br>CAT (Covercrete<br>Absorption Test) | -                             | -                   | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 40             | I                                   | Poskytuje informace o celé<br>povrchové vrstvě.                                                                  | 2) může zkoušku ovlivnit<br>4)                                                                                                                     |
| Figg Test upravený –<br>Poroscope-Plus                      | -                             | ano                 | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 40             | I                                   | b)                                                                                                               | Relativně špatná<br>opakovatelnost                                                                                                                 |
| ISAT                                                        | ano                           | ano                 |                               | ano                                   | ano       | ne      | 150            | P                                   | d)<br>Lehké a přenosné.<br>Citlivé na změny v kvalitě<br>betonu. Nedeaktivní.<br>Byly získány cenné<br>poznatky. | Pouze pro měření absorpce<br>vody do povrchu betonu.<br>Nelze použít na spodní stranu.<br>Nutné dokonalé připevnění na<br>povrchu betonu.<br>4) 5) |

Pozn. Informace není dostupná, neuvedená, není známo = -

Pozn. Informace není dostupná, neuváděná, není známo = „-“

Tab. 10 Zkušební zařízení pro měření absorpce II. a propustnosti vody

| Zkušební metoda /<br>zařízení                 | Problémy<br>srovnávací testy? | Komerční dostupnost | Min. dostupných<br>informací? | Norma / standard /<br>operační postup | Použití   |         | Náročnost<br>[min] | Typ: P-povrchová,<br>I-podpovrchová | Výhody:                                                            | Nevýhody:                                                   |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                                               |                               |                     |                               |                                       | Laborator | In-situ |                    |                                     |                                                                    |                                                             |
|                                               |                               |                     |                               |                                       |           |         |                    |                                     |                                                                    |                                                             |
| Sorpitivita (absorpce)                        |                               |                     |                               |                                       |           |         |                    |                                     |                                                                    |                                                             |
| POROS/tester                                  | -                             | -                   | ano                           | -                                     | ano       | ano     | 75                 | P                                   | Pro svislé i vodorovné<br>plochy.                                  | Malá zkušební plocha.                                       |
| Standpipe Test                                | -                             | ano                 | ne                            | -                                     | ano       | ano     | -                  | P                                   | Pro svislé i vodorovné<br>plochy.                                  | Malá zkušební plocha.                                       |
| Steinert                                      | -                             | -                   | ano                           | -                                     | ano       | -       | -                  | P                                   | Jednosměrný tok.<br>Snadnější interpretace<br>výsledků než u CLAM. | 3) 4) 5)<br>Časově náročná zkouška.                         |
| SWAT (Surface Water<br>Absorption Test)       | -                             | -                   | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 20                 | P                                   | 2 zkušební místa se zkouší<br>zároveň.                             | -                                                           |
| Vodní propustnost                             |                               |                     |                               |                                       |           |         |                    |                                     |                                                                    |                                                             |
| Autoclam Permeability<br>System               | ano                           | ano                 | -                             | -                                     | ano       | ano     | 60                 | P                                   | b)                                                                 | -                                                           |
| GWT (Germann Water<br>permeation Test)        | ne                            | ano                 | ne                            | -                                     | ano       | ano     | 40                 | P                                   | Více druhů zařízení,<br>výrobce přístroj stále vyvíjí.             | 2)<br>Tlak nemusí být dostatečný<br>pro nepropustné betony. |
| FTP (Field Permeability<br>Test: Florid Test) | ne                            | ano                 | ano                           | -                                     | ano       | ano     | 40                 | I                                   | -                                                                  | Velmi málo informací.                                       |

Pozn. Informace není dostupná, neuvedená, není známo = "-"



### 2.3.1 Nedestruktivní přístroje pro měření vnikání/ transportu/toku vody

Pro měření **prostupnosti** povrchové vrstvy vodou bylo vyvinuto několik přístrojů, avšak dostupné informace jsou pouze ke 12 metodám, které v zásadě můžeme rozdělit dle působení dvou vlivů:

1) **metody sorptivity** (absorpce), u nichž je hlavní mechanismus kapilární sání a mohou probíhat pouze v případě, že póry (alespoň ty větší) jsou relativně prázdné. Z tohoto důvodu jsou výsledky všech metod sorptivity silně ovlivněny mírou nasycení pórů v betonu. Řadíme sem metody, při kterých se využívá zanedbatelný tlak:

- a) metody povrchové
  - **Autoclam Sorptivity Systém, CLAM**
  - **ISAT** (Initial Surface Absorption test)
  - **POROSItester**
  - **Standpipe Test**
  - **Steinert**
  - **SWAT** (Surface Water Absorption Test)
- b) metody podpovrchové
  - **Figg Test**
  - **Figg test upravený – CAT** (Covercrete Absorption Test)
  - **Figg test upravený – Poroscope-Plus**

Povrchové vrstvy s vyšší vodní sorptivitou představují betony s nižší kvalitou z hlediska trvanlivosti. Méně kvalitní betony s vysokým obsahem vlhkosti mohou představovat zavádějící nízké hodnoty vodní sorptivity. Naopak betony, které nejsou nasyceny, vykazují abnormálně vysoké hodnoty vodní propustnosti, jako je tomu v případě metody FPT.

Klasické metody měření sorptivity zde uvedeny nejsou, jedná se o přehled přístrojů vyvinutých k měření specifických veličin.

2) **metody propustnosti**, při kterých působí kapilární sání a externě působící tlaková síla vody vnikající do pórů systému betonu.

- a) metody povrchové
  - **GWT**
  - **Autoclam Permeability System**
- b) metody podpovrchové
  - **FTP** (The Field Permeability Test)

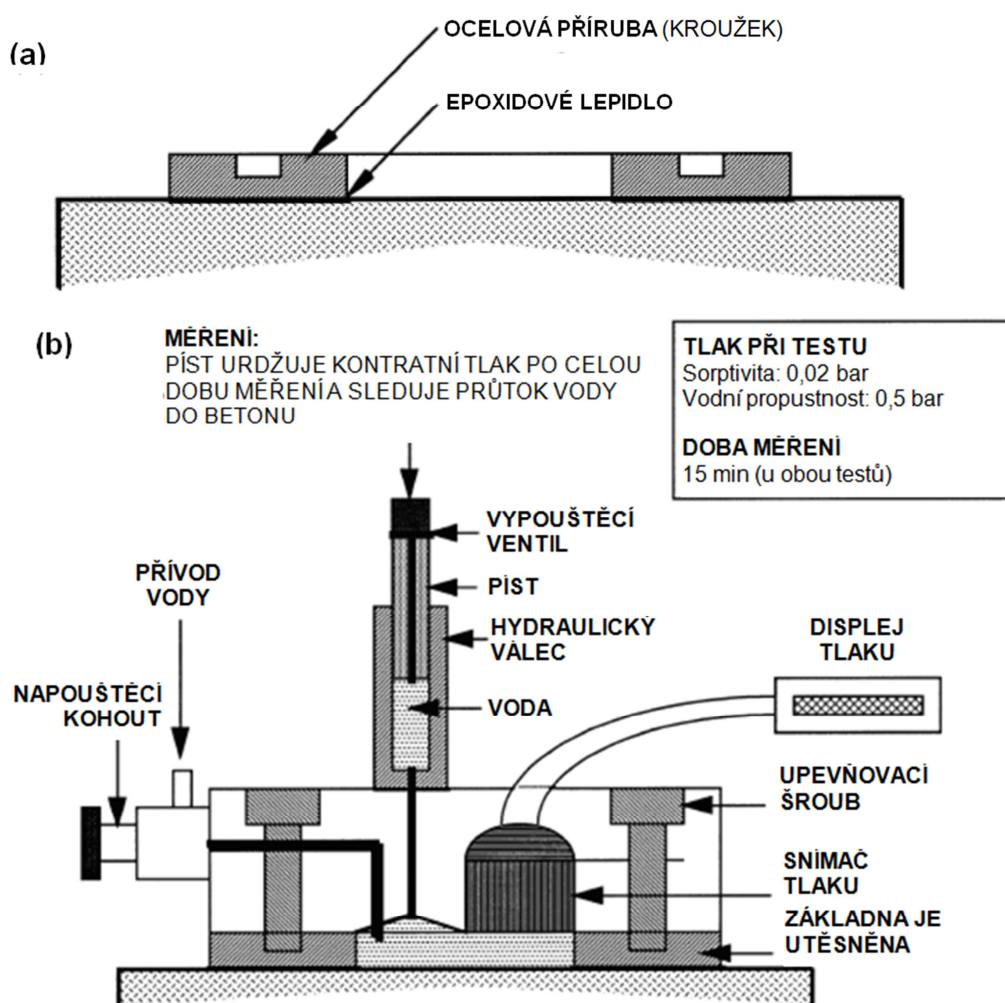
Metody propustnosti využívají poměrně vysoké okolní tlaky vody v rozmezí 10-35 barů u metody FPT a až 6 bar pro metody Autoclam Permeability Systém a GWT.

Všechny výše popsané metody nejsou komerčně dostupné. Pouze jedna z výše uvedených metod je standardizována (ISAT).

### 2.3.1.1 Autoclam Permeability System

Zkušební metodu CLAM vyvinuli F. R. Montgomery a A. Adams jako nedestruktivní zkoušku vodní propustnosti. Tato zkouška byla upravena na základě měření vzduchové propustnosti a vodní absorpce (sorptivity) prostřednictvím výzkumu P. A. M. Basheera a A. E. Longa (1993) z královské univerzity v Belfastu, v severním Irsku, na metodu Autoclam.

Autoclam Permeability System je nedestruktivní měřicí zařízení určené k měření vodní i vzduchové propustnosti, a také absorpci vody v přízemních objektech z betonu a jiných porézních stavebních materiálů (cihelne i kamenné zdivo), a to jak v laboratořích, tak i in-situ. Je vhodný pro měření těchto povrchových vlastností betonu, které mají vliv na jeho trvanlivost a vlastnosti v normálním nebo agresivní prostředí. [16]

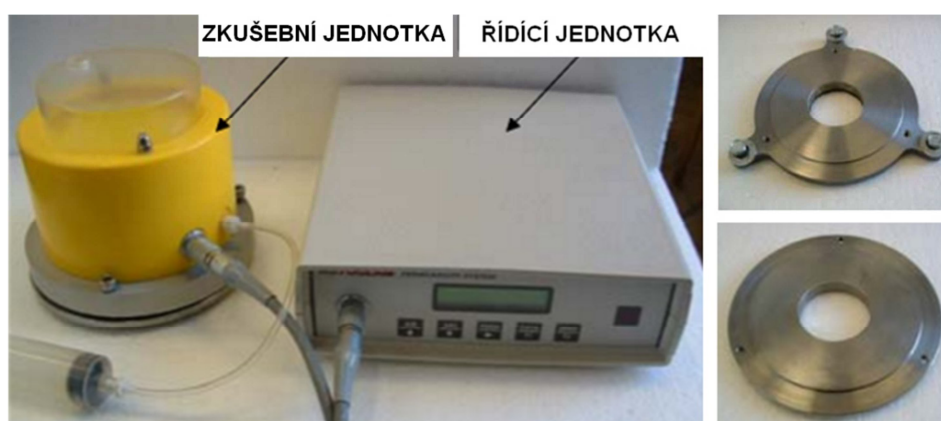


Obr. 16 Schéma metody Autoclam Permeability Systém (a) upevnění (b) způsob ovládání [57]

Pro stanovení propustnosti pro vodu se nejčastěji používá měřicí hlava o průměru 50 mm a voda pronikající do betonu s výškou hladiny 200 mm vyvodí konstantní tlak 0,02 bar (0,5 bar v případě méně propustných povrchů, kde průtok vody je nízký, avšak je třeba větší kontaktní plocha vodního zdroje s nutností přepočtu na základní uspořádání).

Součástí přístroje je elektronická jednotka pro záznam dat, zkušební jednotka (žlutá) a regulační jednotka. Rozpětí tlaku je 1bar ( $\pm 1\%$ ) při provozní teplotě 0 - 50 °C, objemu nádrže 100 ml. Rozsah propustnostních vlastností: Index prodyšnosti je 0 - 3,912 ln (tlak) za min. a absolutní maximální rychlost vypnutí proudu je 1ml/min.

Po provedení testu nezůstávají na povrchu betonu žádné stopy. Celková doba trvání každého testu je max. 30 minut včetně lepení kroužku na povrch betonu a s jedním akumulátorem lze provést až 12 testů, je-li k dispozici externí zdroj napájení. Jedna obsluha může udělat až 20 testů za jeden den. Data z každého testu je uloženy v řídicí jednotce přístroje a mohou být buď zaznamenány ručně, nebo přenést do počítače pro další analýzu.



Obr. 17 Autoclam permeability systém a dva typy přírub pro měření [16]

Propustnost pro plyny může být provedena na většině stavebních materiálů, jejichž koeficient propustnosti je menší než  $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ . Propustnost pro vodu i absorpci lze provádět na nepropustných materiálech, v nichž byl maximální průtok vody 1 ml/min.

Na základě rozsáhlých zkušeností výrobce přístroje Autoclam byla navržena kritéria vzduchové propustnosti prostřednictvím indexu ochranné kvality betonu z běžného portlandského cementu (viz násl. tabulka).

Tab. 11 Kvalita betonu v závislosti na indexu vzduchové propustnosti [2]

| Kvalita betonu                                  | velmi dobrá | dobrá             | nízká            | velmi nízká |
|-------------------------------------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|
| Index vzduchové propustnosti<br>[Ln(bar)/min] * | < 0,10      | $\geq 0,10 < 0,5$ | $\geq 0,5 < 0,9$ | $\geq 0,9$  |

\* Vzorky s portlandským cementem, které byly v klimatizované v sušárně po dobu 14 dní při teplotě 40 °C a relativní vlhkosti 20 %.

Tab. 12 Kvalita betonu v závislosti na sorptivitě [2]

| Kvalita betonu                                                      | velmi dobrá | dobrá              | nízká              | velmi nízká |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------|
| Index sorptivity [ $\text{m}^3 \cdot 10^{-7} / \sqrt{\text{min}}$ ] | $\leq 0,13$ | $> 0,30 \leq 2,60$ | $> 2,60 \leq 3,40$ | $> 3,40$    |

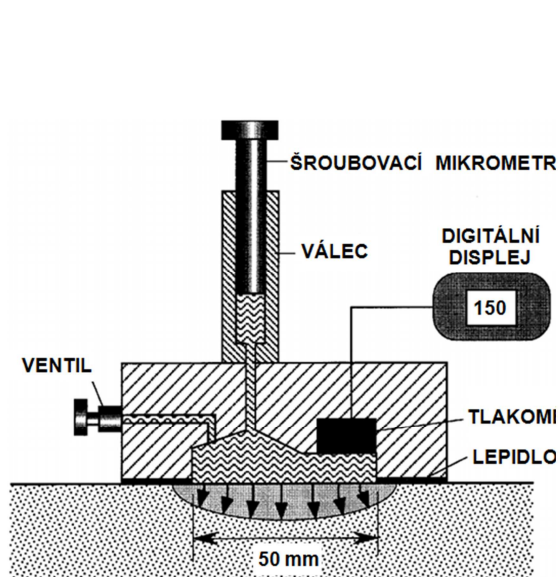
Přístroj Autoclam je komerčně dostupný ve čtyřech verzích u společností Amphora NDT Ltd, Belfast, Velká Británie.

### 2.3.1.2 CLAM

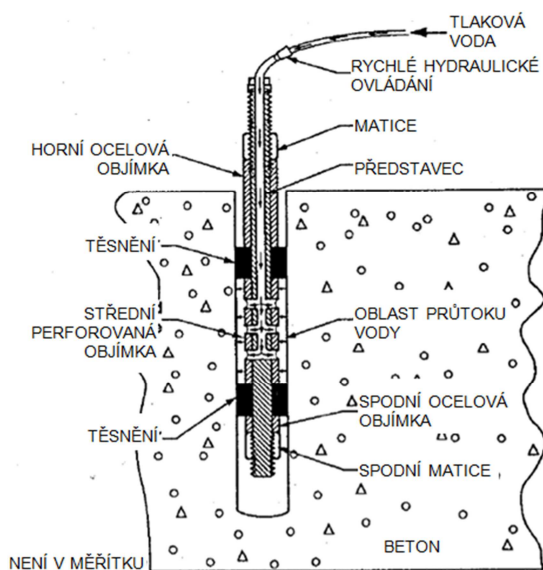
Metoda CLAM, předchůdce metody Autoclam, měří průtok vody do povrchu betonu pod pevně stanoveným tlakem. Speciálně navržená měřicí komora se lepí na povrch betonu a je opatřena šroubovým mikrometrem i tlakoměrem pro měří tlaku vody. Při měření se postupuje tak, že se měřicí komora přilepí na povrch, zaplní se vodou, mikrometrický šroub se otočí tak, aby byl zachován konstantní tlak vody o 150 kPa nad atmosférický tlak a pohybem mikrometru se odečítají a zaznamenávají hodnoty v pravidelných intervalech. Zasouvání šroubového mikrometru udává objem vody, která proniká do betonu.

Objem vsáknuté vody do beton v závislosti na čase poskytuje informace o propustnosti betonu. Vzhledem k tomu, že se jedná o průtok vody do betonu a není splněna podmínka ustáleného stavu, jedná se spíše o zjištění indexu propustnosti než koeficientu propustnosti.

Test CLAM lze provádět i při nižším tlaku vody tak, že penetrace je řízena primárně absorpcí, spíše než kombinací absorpcí a propustností vody. Při měření absorpce mikrometr udržuje tlak vody na 1 kPa. Jedno měření trvá cca 30 min. [57]



Obr. 18 Schéma zařízení CLAM [57]



Obr. 19 Schéma metody FTP [2]

### 2.3.1.3 FTP (The Field Permeability Test)

Tato metoda byla vyvinuta Meletiou Konstantine na Floridské universitě v Gainesville, USA.



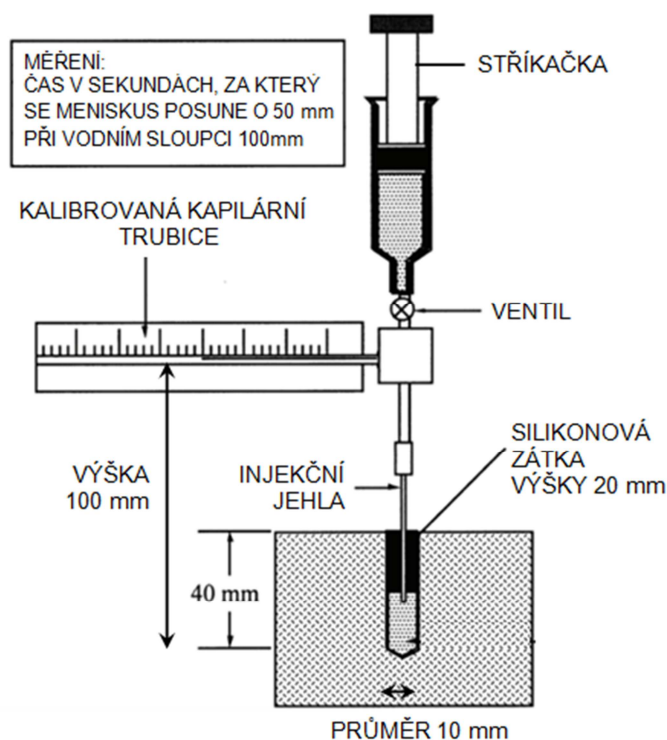
Do betonového povrchu se vyvrtá otvor o průměru 23 mm a hloubce 152 mm. Válcová sonda se vloží do otvoru a utěsní se neoprenovou ucpávkou. Dutá sonda se připojí k přístrojové jednotce a působí se vodou pod tlakem dusíku v rozmezí 10 až 35 bar (zpravidla 17 bar). Tlak vody radiálně proudí do okolního betonu. Ustáleného stavu proudění je dosaženo asi po 30 min, kdy se průtok zaznamenává v intervalu od 5 do 15 min po dobu max. 2 h prostřednictvím kapilárního průtokoměru. Tlak a průtok umožňují výpočet koeficientu propustnosti  $K_{fpt}$  podle D'arcyho zákona.

Celková doba trvání jednoho měření je 3 h, neboť jen měření trvá 2 h a příprava zkušební místa (vrtání vývrtu, vložení sondy a stabilizace) trvá cca 1 h.

#### 2.3.1.4 Figg Test

Tuto metodu vyvinul J.W. Figg v roce 1973 a je vhodná pro zkoušení vzduchové propustnosti i vodní sorptivity. Do zkušební vzorku se vyvrtá otvor o průměru 10 mm a hloubky 40 mm. Po vyčištění se otvor uzavře pryžovou zátkou a osadí se dutá jehla. Jehla se zaplní vodou a udržuje se konstantní tlak (výška vodního sloupce  $h = 100$  mm). Měřenou veličinou je čas, za který se meniskus v kapiláře přemístí o 50 mm.

U původní verze Figgova testu byl vyvrtán otvor průměru 5,5 mm a hloubky 30 mm, ale z důvodu malého vývrtu ve zkušebním vzorku měla metoda velký rozptyl naměřených hodnot v různých měřicích místech. Z tohoto důvodu ji v roce 1984 upravil p. Cather a kol. dle výše uvedeného, a na metodu CAT upravil Dhir a kol. Metodu lze využít i pro měření vzduchové propustnosti a to i několikrát na jednom zkušebním místě. Metodu nelze použít pro rozlišení účinnosti různých povrchových úprav a vlivu propustnosti bedněných konstrukcí. [39]

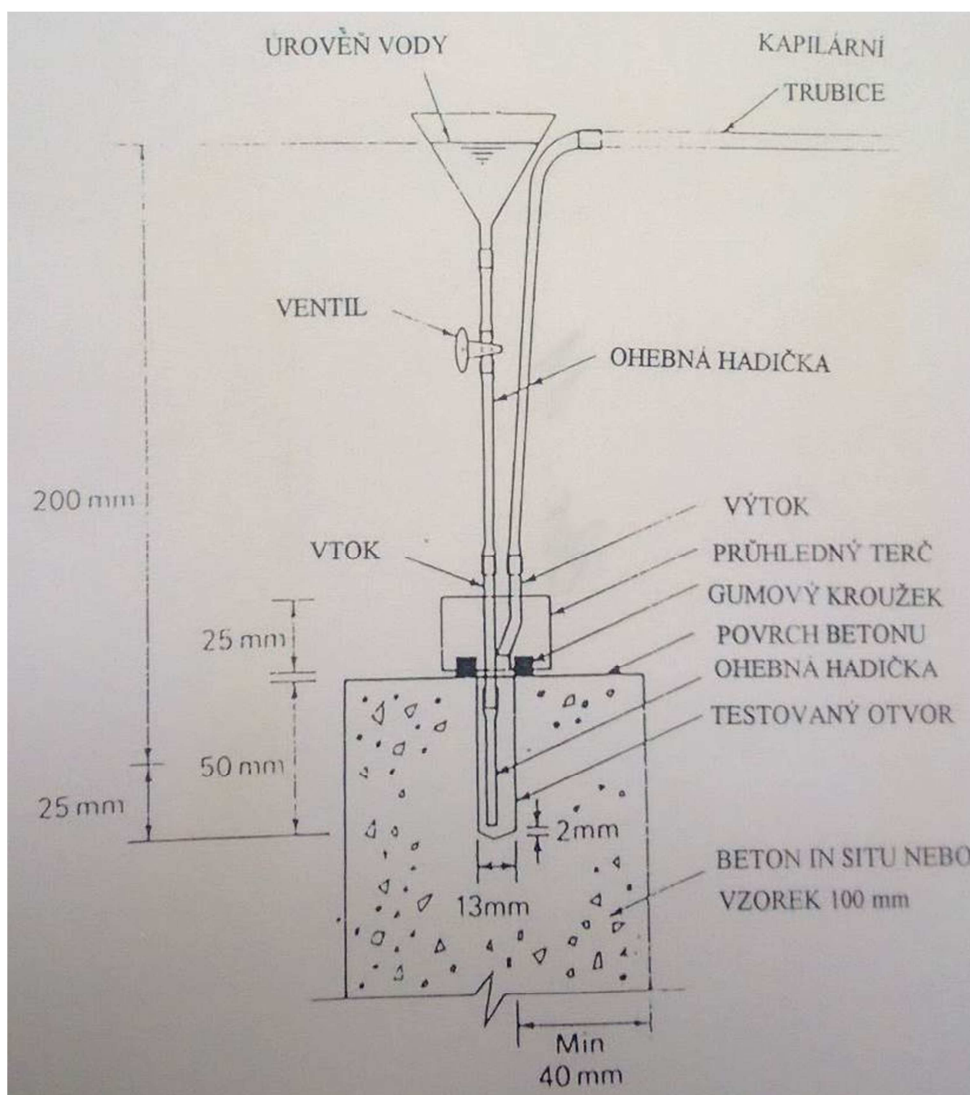


Obr. 20 Schéma Figg Test pro vodu [59]

### 2.3.1.5 Figg Test upravený – CAT (Covercrete Absorption Test)

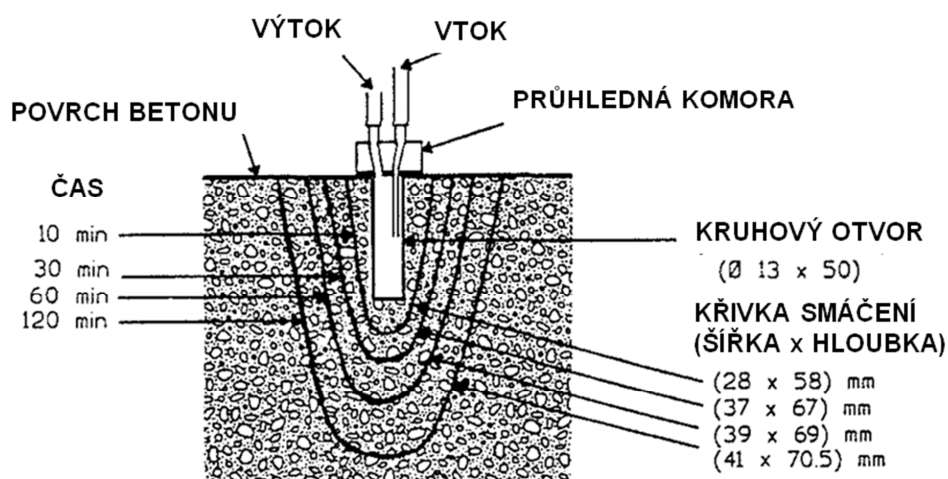
Metoda CAT byla vyvinuta p. Dhirem a kol. (1987) k měření absorpce vody povrchovou vrstvou betonu a stejně jako mnoho dalších testů vychází z Figgova testu.

Při zkoušce se postupuje tak, že se do betonu vyvrtá otvor o průměru 13 mm s hloubkou 50 mm a ocelovým svorníkem se na toto místo připevní zařízení CAT. Skleněná kapilára je zasunuta do dutiny vývrtu a po napuštění se udržuje voda ve výšce 200 mm. Hodnotu povrchové absorpce betonu udává pokles hladiny menisku vody v kapiláře mezi 10 a 11 minutou. Touto metodou lze získat spolehlivé výsledky s variačním součinitelem okolo 8 %. Výsledky získané metodou CAT jsou velmi obdobné výsledkům měření metodou ISAT. [25]



Obr. 21 Schéma zařízení CAT [25]

Velmi zajímavé jsou také křivky smáčení na následujícím obrázku, které ukazují, do jaké hloubky voda vnikne.

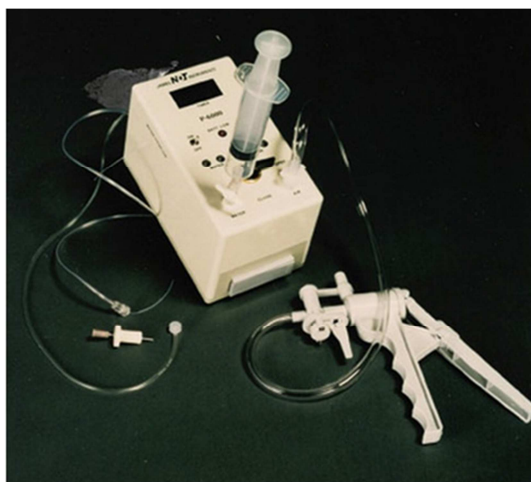


Obr. 22 Typické křivky smáčení vodou o teplotě 35°C po provedení metody CAT [61]

### 2.3.1.6 Figg Test upravený – Poroscope-Plus

Toto automatické zařízení slouží ke stanovení vodní i vzduchové propustnosti a vychází z Figgova testu.

Do zkušebního vzorku se vyvrtá otvor o průměru 10 mm a hloubce 40 mm, vyčistí se a uzavře se pryžovou zátkou o průměru 10 mm a hloubce 20 mm. Do pryžové zátky se vloží konektor a osadí se horní část injekční jehly.



Obr. 23 Foto Poroscope-Plus [67]



Obr. 24 Foto Poroscope-Plus [67]

Pro stanovení vodní propustnosti se používá stejná komora jako u zkoušky vzduchové propustnosti. Injekční jehla se zaplní destilovanou vodou a vytlačuje vzduch ze zkušební dutiny přes přepadovou trubku, která je 100 mm nad povrchem betonu. Snímač průtoku instalovaný v injekční jehle automaticky měří čas (s), za který materiál propustí 0,01 ml vody (meniskus klesne o 50 mm).

Pro vyhodnocení výsledků měření se používá následující tabulka.

Tab. 13 Klasifikace povrchu metodou Poroscope (vodní absorpcí) [2]

| Kategorie betonu | 0      | 1          | 2        | 3         | 4           |
|------------------|--------|------------|----------|-----------|-------------|
| Kvalita povrchu  | špatná | dostatečná | střední  | dobrá     | velmi dobrá |
| Čas měření [s]   | < 20   | 20 – 50    | 50 – 100 | 100 – 500 | >500        |

Zařízení je komerčně dostupné u společností James Instruments Inc. a Qualitest.

#### 2.3.1.7 GWT (Germanns Water Permeability Tester)

Pro stanovení propustnosti povrchových vrstev betonu pro vodu vyrábí dánská firma Germann Instruments přístroj GWT (Germanns Water Permeability Test). Metoda pracuje na principu měření rychlosti průtoku tlakové vody strukturou povrchové vrstvy v čase. Více o této metodě je uvedeno v následujících kapitolách, protože toto zařízení bylo použito pro srovnávací měření. Obecný popis je uveden v kapitole 5.1.2.

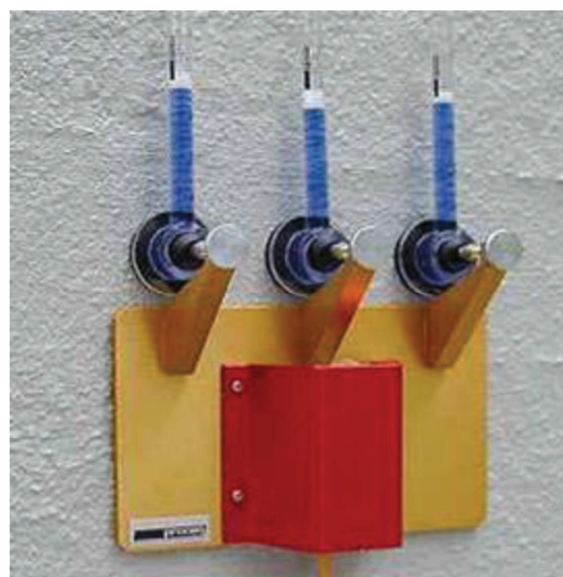
Zařízení je komerčně dostupné u společnosti Germann Instruments.

#### 2.3.1.8 ISAT (Initial Surface Absorption Test)

Pro stanovení počáteční povrchové propustnosti se využívá metoda Initial Surface Absorption Test (dále ISAT), která byla vyvinuta ve Velké Británii jako metoda pro měření stavu povrchové struktury betonu a je specifikována britskou normou BS 1881-208:1996 [16]. Více o této metodě je uvedeno v následujících kapitolách.

#### 2.3.1.9 POROSItester

Je zcela nedestruktivní zkouška a používá se k měření absorpce vody pro svislé i vodorovné plochy, zejména pro fasády. Kruhový gumový kroužek je připojen k zařízení, aby se eliminovaly nerovnosti povrchu. Vnitřní průměr misky je pouze 19 mm. Zařízení je na zkušební místo připevněno pomocí vakua. Zkouška může být provedena s 1-3 zkumavkami v intervalech 15, 30 nebo 60 minut.



Obr. 25 Vertikálně umístěný přístroj POROSItester [59]



### 2.3.1.10 Standpipe Test

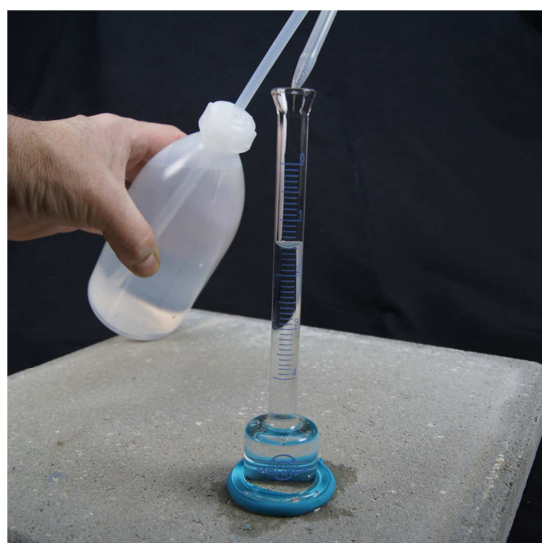
Jeden z nejjednodušších testů byl vyvinutý A. Mayerem pro měření absorpce betonu. Měřicí zařízení se skládá z vertikální měřicí trubice, která se nalepí na vodorovný povrch betonu, zaplní vodou a měří se množství absorbované vody v čase.



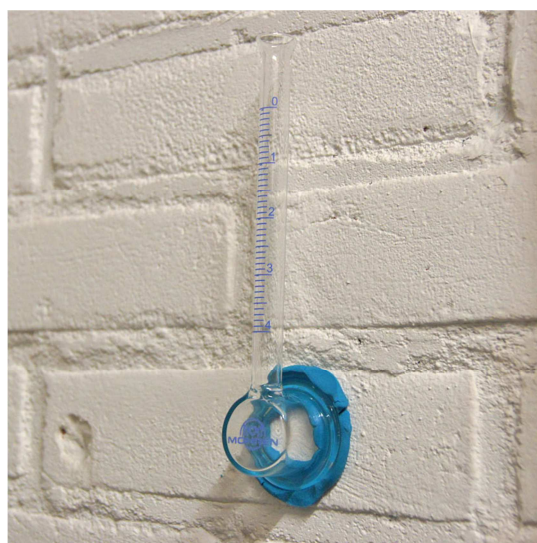
Obr. 26 Kompletní měřicí sada TQC Karsten Tube [59]



Obr. 27 Foto metody dr. Carstense [58]



Obr. 28 Sada TQC Karsten Tube pro horizontální měření [59]



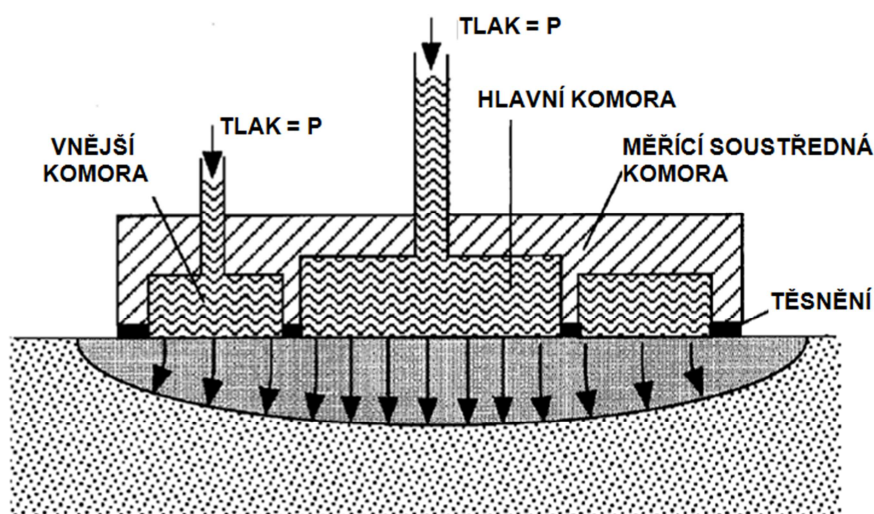
Obr. 29 Sada TQC Karsten Tube pro vertikální měření [59]

Mezi Standpipe Test patří i TQC Karsten Tube vyvinutá dr. Karstenem. Metoda je určena pro měření absorbované vody ve stavebních materiálech a prefabrikovaných dílcích. Lze ji použít pro vodorovný i svislý povrch, v laboratoři i in-situ. Zkušební sada se skládá ze tří svislých a tří vodorovných speciálních skleněných nádobek s baňkou o průměru 30 mm a se stupnicí o objemu 10 ml ( $=10\text{ cm}$ ), a stříčky o objemu 25 ml. Pro připevnění se používá plastelína, silikon, polyuretan, butylová pryž, cement apod. a musí zůstat zkušební plocha o průměru min. 20 mm, což odpovídá zkušební ploše  $3\text{ cm}^2$ . Při měření se postupuje tak, že se zařízení připevní na zkušební místo a naplní se kohoutkovou vodou až po horní rysku (max.

100 mm, tj. tlak vody odpovídající hurikánu). Sleduje se pokles hladiny v pravidelných intervalech a výsledkem je množství vody absorbované do betonu v čase při známé ploše. Zařízení distribuuje společnost LABTECH s.r.o. [58]

### 2.3.1.11 Steinert

Steinertova metoda (1979) využívá principu strážného kroužku, který dosahuje lepší aproximaci jednosměrného toku pod tlakem. Měřicí komora, která je složena ze dvou soustředných komor oddělených kruhovým gumovým těsněním, je přilepena na povrch betonu. Soustředné komory jsou naplněny vodou a pod tlakem 600 kPa se stlačeným vzduchem. Průtok do vnitřní komory je přibližně jednosměrný, takže záznam toku je funkcí času a tuto metodu je jednodušší interpretovat než u metody CLAM.



Obr. 30 Schéma Steinertovy metody [57]

### 2.3.1.12 SWAT (Surface Water Absorption Test)

SWAT je jednoduchá, nedestruktivní, rychlá a variabilní zkouška, která byla vyvinuta v Japonské laboratoři Yokohama National University pány Hayashi & Hosoda. Zkušební metoda pracující na principu absorpce vody trvá pouze 10 minut a za tuto dobu lze zjistit kvalitu povrchové vrstvy v hloubce 10 až 30 mm.

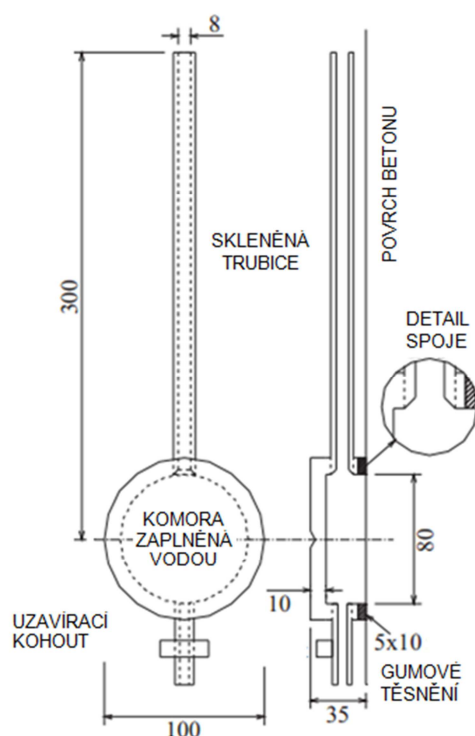
Zkušební zařízení se skládá z:

- 2 měřících plastových komor s trubicí (kapilárou) a gumovým těsněním tl. 5 mm,
- 2 vakuových komor, které společně s ocelovým rámem a šrouby ukotví měřicí komory na povrch betonu,
- vakuové pumpy se vzduchovými trubicemi pro připevnění vakuových komor,
- přívodu vody.

Před samotným měřením se zkušební místo důkladně očistí, zjistí se teplota a vlhkost povrchu. Ocelový rám s vakuovými komorami se přiloží na zkušební místo a připevní k povrchu betonu vakuovou pumpou. Zkušební komory se připevní na zkušební místo

utažením šroubů na ocelovém rámu. Zařízení se připojí na vodu, zásobník se zvedne 200 až 300 mm nad střed zkušebního místa a komora se zaplní vodou. Spustí se stopky, otevře se kohout na 10 s, a zaznamená se počáteční hodnota v čase 10 s a dále po 60 s. Stejným postupem se naplní i druhá komora. Průběžné měření se provádí vždy po 1 minutě až do dovršení 10 min. Zkušební zařízení se vypustí otevřením kohoutu, odšroubováním buněk a vypnutím vakuové pumpy.

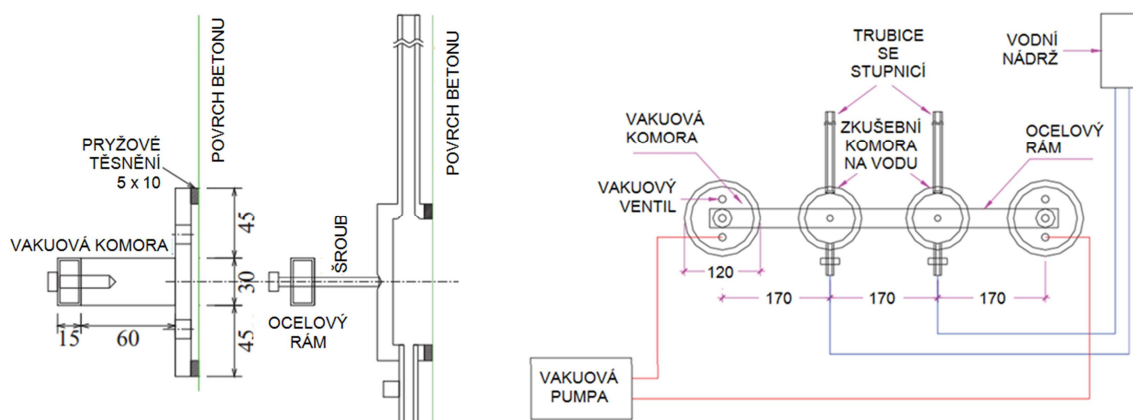
Bylo zjištěno, že kromě hodnocení kvality povrchové vrstvy přístroj SWAT identifikuje i různé podmínky vytvrzování a poměr v/c. Touto metodou lze účinně detekovat mikrotrhliny v cementu, kamenivu nebo odolnost proti smrštění.



Obr. 31 Schéma metody SWAT [59]



Obr. 32 Foto metody SWAT [59]



Obr. 33 Schéma metody SWAT: (a) detail upevnění; (b) rozložení při testu [59]

### 2.3.2 Nedestruktivní přístroje pro měření vnikání/transportu/ toku vzduchu

Pro měření **vzduchové propustnosti** jsou dostupné informace o 14 měřidlech, které lze rozdělit do dvou skupin:

- 1) metody povrchové, které se používají přímo na povrchu betonové konstrukce
  - a) metody jednokomorové: **Autoclam** (CLAM), **Schönlín** a **SAF**
  - b) metody dvoukomorové: **TPT**, **Permea-TORR** a **Zia-Guth**
  - c) metody použitelné pouze na vývrtech: **Cembureau**, **OPI**
- 2) metody podpovrchové, pro které je nutné do povrchu betonu vyvrtat zkušební otvor nebo otvor pro uchycení zařízení: **Figg**, Figg Test - **Poroscope**, **TUD**, **Hong-Parrott**, **Paulmann** a **GGT**.

Všechny metody, zejména Paulmann a GGT, pracují na stejném základním principu: uvnitř uzavřené komory na povrchu betonu se vytvoří přetlak nebo podtlak a měří se rychlost průtoku. Tato rychlost je přímo spojena s propustností betonu v okolí komory, protože plyn, který je řízen tlakovou hlavou, se bude pohybovat prostřednictvím sítě betonových pórů zasažených měřenou plochou. U metod Paulmann a Germann je udržován vnější tlak konstantní a propustnost betonu se vyhodnocuje měřením průtoku plynu na povrchu betonu (Paulmann) nebo tlak při dané výši (Germann) v čase. Obecně platí, že více plynopropustné povrchové vrstvy jsou nižší kvality z hlediska trvanlivosti, avšak nekvalitní betony s vysokým obsahem vlhkosti mohou představovat zavádějící nízké hodnoty plynopropustnosti.

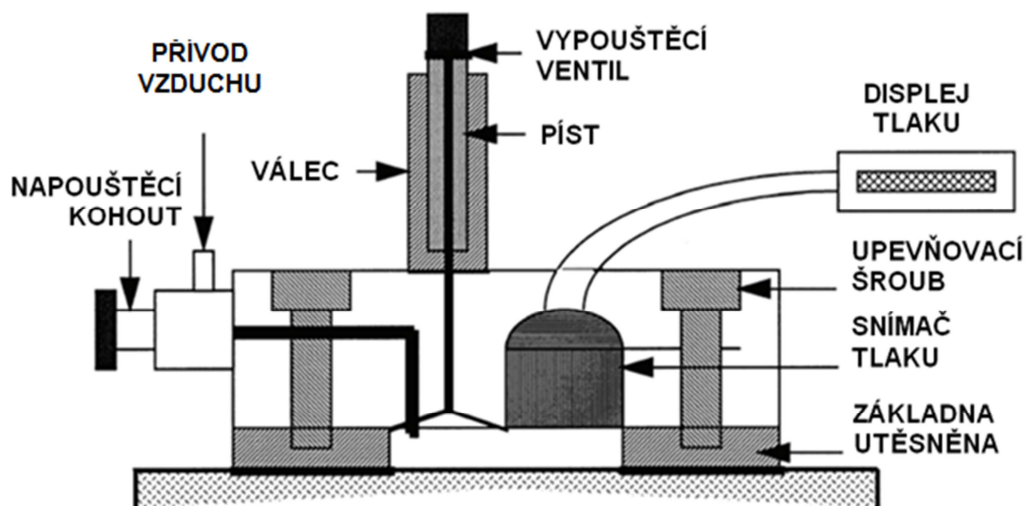
Obecně platí, že vzduchopropustné testy jsou jednodušší na provedení než zkoušky na vodní bázi. V následujících kapitolách jsou uvedeny podrobnosti k těmto metodám.

#### 2.3.2.1 *Autoclam*

Přístroj je téměř stejný jako AUTOCLAM pro měření propustnosti pro vodu, kde jsou také uvedeny kompletní informace k tomuto zařízení.

Při měření se postupuje tak, že se uvnitř zkušební komory zvýší tlak na 50 kPa a poté se uzavře ventil. Každou minutu se sleduje pokles tlaku v komoře po dobu 15 min. Grafické znázornění tlaku je zaznamenáno logaritmicky a čas přímkou. Lineární regresní přímka vystihuje index vzduchové propustnosti a jednotkou je počet jednotek tlaku /min. Více informací k této metodě je uvedeno výše u AUTOCLAMu při použití vody.





Obr. 34 Schéma metody AUTOCLAM pro stanovení vzduchové propustnosti [59]

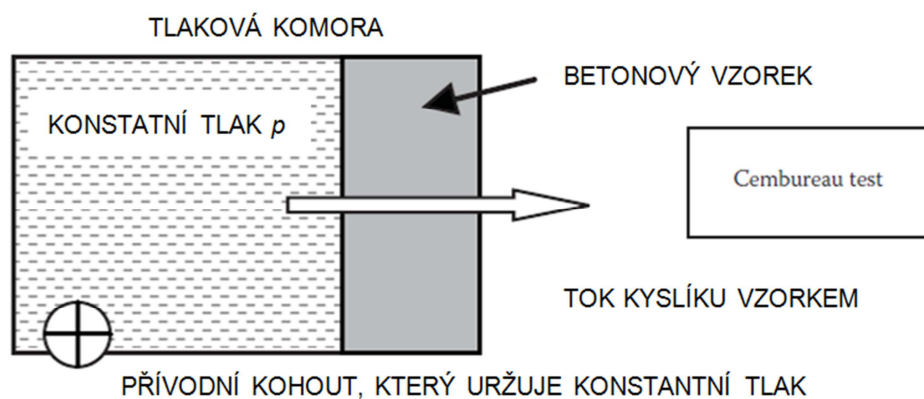
### 2.3.2.2 Cembureau

Zkratka Cembureau vychází z anglické zkratky Evropského svazu výrobců cementu (The European Cement Association) a metoda je preferována RILEMem.

Metoda Cembureau se používá pro stanovení propustnosti kyslíku betonovým vzorkem a odpovídá Hagen-Poiseuilleova vztahu.

Jedná se o metodu ryze laboratorní a pro hodnocení jsou nutné vývrty z konstrukce. Přístroj se skládá z buněk pro vzorky o průměru 150 mm a výškou 50 mm, objemového průtokoměru plynu, regulátoru tlaku, digitální odečítací jednotky se snímačem tlaku a panelu z nerezové oceli pro montáž systému na stěnu.

Vzorky se stabilizují při teplotě 20° C a 65 % relativní vlhkosti po dobu 28 dnů, alt. mohou být sušeny při 105 ° C po dobu 7 dnů, i když to může vést k závažnému poškození betonové mikrostruktury. Konstantní tlak působí na jednom konci vzorku a průtok plynu se měří na straně druhé. Průtok plynu je závislý na rozdílu tlaků, testovací oblasti, tloušťce vzorku a viskozitě zkušebního plynu. Test Cembureau poskytuje spolehlivé a opakovatelné výsledky a je obdobnou metodou jako OPI test.



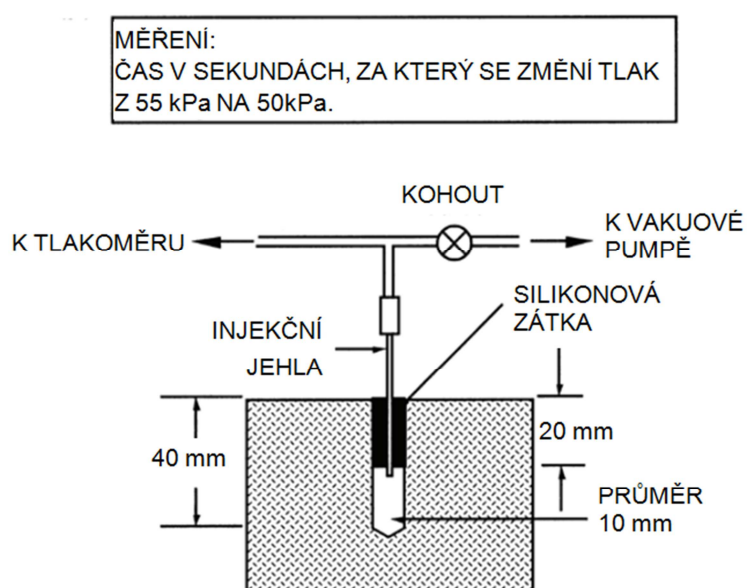
Obr. 35 Schéma metody Cembureau [22]



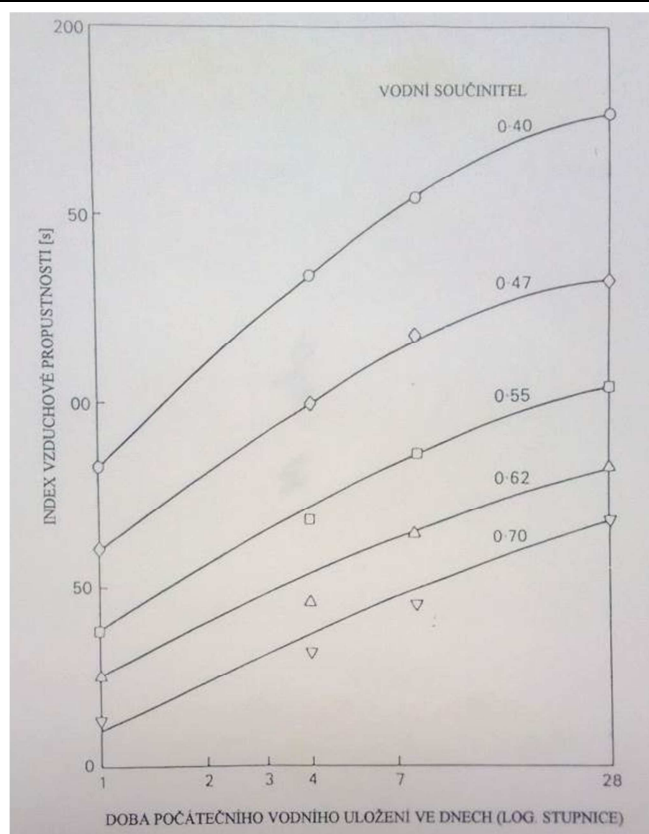
Obr. 36 Metoda Cembureau – vlevo měřicí zařízení [56], vpravo nahoře měřicí nádoba [56], vpravo dole schéma kyslíkové metody [6]

### 2.3.2.3 Figg Test

Měřicí zařízení vyvinuté J.W. Figg v 70. letech je totožné jako zařízení pro měření vodní propustnosti jen s tím rozdílem, že není použita injekční jehla, ale zařízení je připojeno k ručnímu čerpadlu. Ve zkušební otvoru je snížen tlak na 55 kPa pod atmosférický tlak. Poté se ventil uzavře a měří se doba, za kterou se zvýší tlak o 5 kPa. Tato doba je označena jako index vzduchové propustnosti.



Obr. 37 Schéma Figgova Testu pro vzduch [59]



Obr. 38 Vliv podmínek ošetřování na koeficient vzduchové propustnosti betonu Figgovým Testem ve stáří 28 dnů [25]

#### 2.3.2.4 Figg Test upravený – Poroscope-Plus

Toto automatické zařízení slouží ke stanovení vodní i vzduchové propustnosti a vychází z Figgova testu. Do zkušebního vzorku se vyvrtá otvor o průměru 10 mm a hloubce 40 mm, vyčistí se a uzavře se pryžovou zátkou o průměru 10 mm a hloubce 20 mm. Do pryžové zátky se vloží konektor a nasadí se horní část injekční jehly. Pro stanovení koeficientu vzduchové propustnosti se měří čas potřebný k poklesu vakua z 55 kPa na 50 kPa a na přístroji se automaticky zobrazí čas. [18]



Obr. 39 Foto Poroscope-Plus [67]



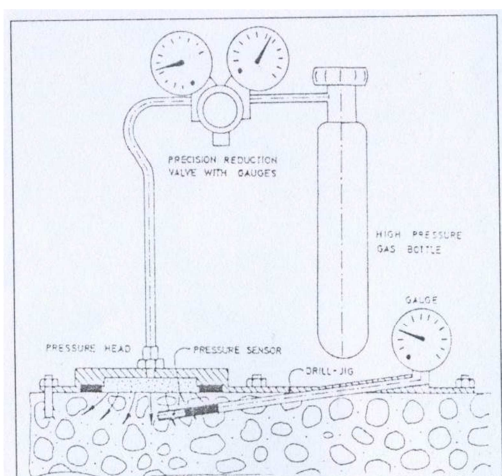
Obr. 40 Foto Poroscope-Plus [67]

### 2.3.2.5 GGT (German's Gas Test)

Tato metoda byla vyvinuta kolektivem autorů: A.J.Hansen, N.S.Ottosen a C.G. Petersen při zkouškách in-situ v dánském Copenhagenu.

Před samotným měřením je nutné připravit zkušební povrch pro osazení přístroje tak, že se do dvou vyvrtaných otvorů osadí ocelové kotvy, které fixují upínací kleště. Přístroj s tlakovou hlavou se připevní k povrchu betonu pomocí těchto dvou upínacích kleští a těsnost mezi betonem a přístrojem se vyplní silikonovým spojem na těsnícím kroužku. Tlaková hlava je schopna rozlišovat velmi malé změny tlaku v betonu a průměr hlavy 60 mm byl volen s ohledem na minimalizaci kolísání výsledků z důsledku přítomnosti hrubého kameniva. Tlaková hlava je spojena s vysokotlakým plynem  $\text{CO}_2$ , kde je na láhvi redukční ventil s možnou korekcí v rozmezí 1 až 4 bar. Délka zkoušky je obvykle 2 min., 5 min. nebo 10 min. Stejně jako u přístroje GWT i u této metody probíhá vývoj nových modelů, u kterých se vyvrtá otvor pod úhlem  $45^\circ$  a vloží se do něj snímač tlaku.

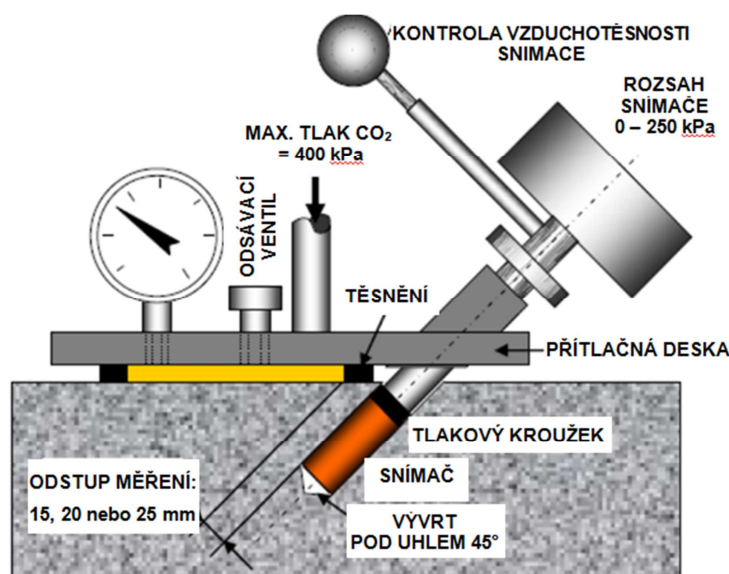
Přístroj je komerčně dostupný u společnosti Germann Instruments, Německo. [20]



Obr. 41 Schéma metody GGT [2]



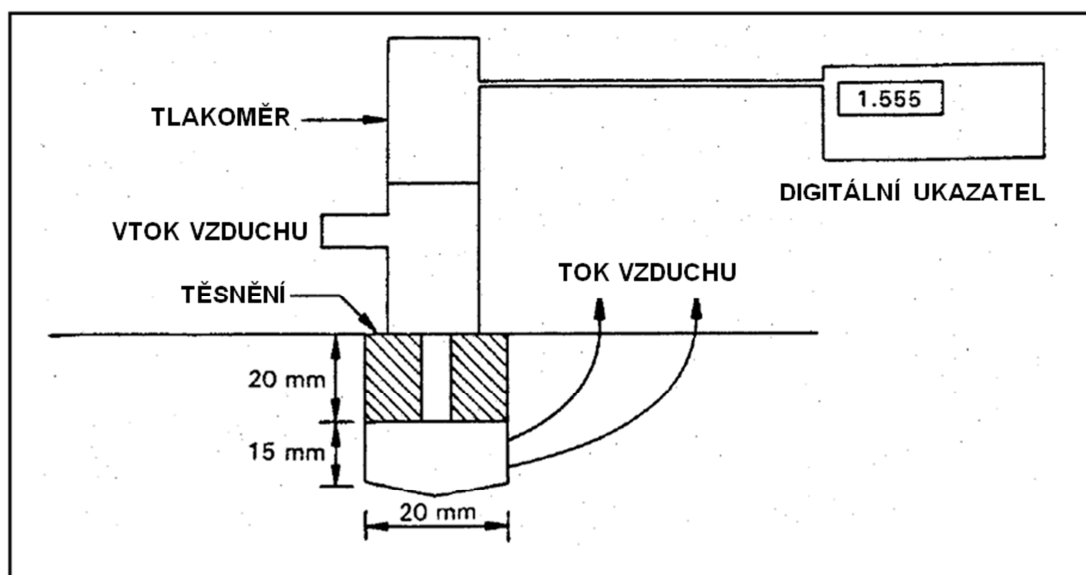
Obr. 42 Foto metody GGT [2]



Obr. 43 Schéma metody GGT dle [64]

### 2.3.2.6 Hong-Parrott

Tato metoda byla vyvinuta C. Z. Hongem a L. Parrottem při British Cement Association. Při měření se postupuje tak, že se do betonového povrchu vyvrtá otvor hloubky 35 mm a s průměrem 20 mm. Po osazení měřidlem se utěsnění otvor pryžovou těsnicí manžetou. Převodník a digitální ukazatel se připojí k elektrickému proudu. Dutina se natlakuje vzduchem mírně nad jednu atmosféru, a měří se čas potřebný nutný ke snížení tlaku z 50 kPa na 35 kPa. Na povrch betonu v okolí otvoru se kartáčem nanese mýdlový roztok, který vytváří jemné bublinky, protože vzduch proudící přes okolní beton (obvykle do 35 mm poloměru kolem dutiny). Pokud je beton s trhlinami nebo nedostatečně zhutněný, objeví se velké bubliny. [19]

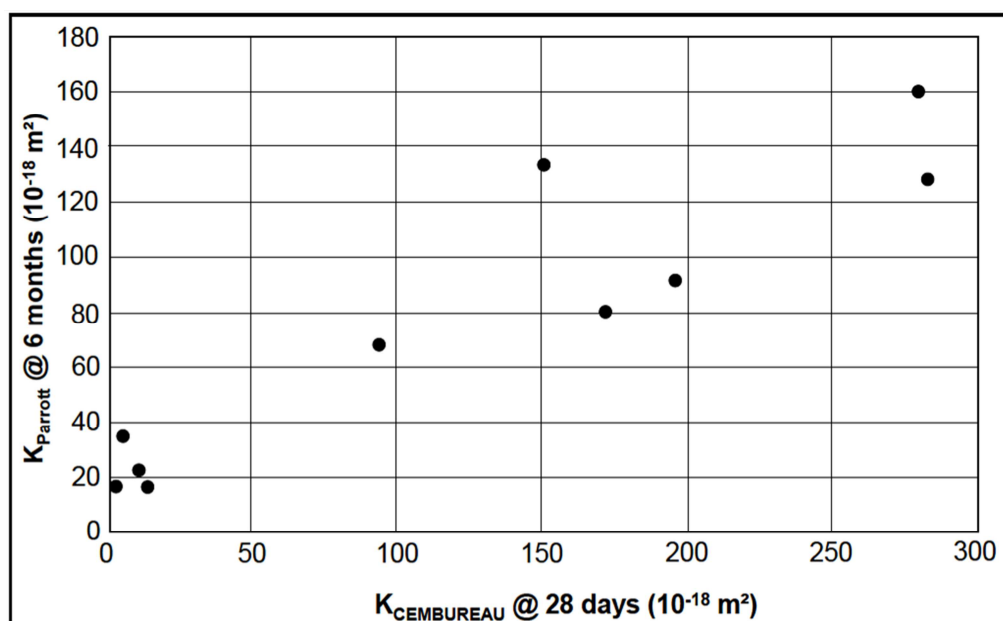


Obr. 44 Schéma Hong-Parrott [2]

Měřený čas je převeden do zdánlivé permeability, neboť roztok mýdlových bublin ovlivňuje zkoušku. Absolutní hodnota propustnosti nemůže být vypočítána, protože parametry vzduchové propustnosti mohou být ovlivněny faktory, jako jsou praskliny, vlhkost a přechody pórovitosti.

I na tuto metodu se vztahují obdobné poznatky jako na metodu Poroscope, avšak velikost zkušebního otvoru je 4x větší. Při opakovaném měření na stejném otvoru dosáhneme v podstatě stejných výsledků (koeficient variability 2%), což znamená, že jedno měření na jednom otvoru je dostatečné. Koeficient variability mezi vzorky se pohybují mezi 4% a 16%, což je velmi dobré. Naopak výsledky vykázané Goncalves a Neves ukázaly velmi vysoké hodnoty okolo 42%, což bylo nejvyšší z pěti analyzovaných metod.





Obr. 45 Grafické znázornění výsledků s metodou Hong-Parrott a Cambureau [2]

Obrázek výše porovnává zdánlivou propustnost naměřenou metodou Parrott ve stáří 6 měsíců s koeficientem propustnosti pro  $\text{O}_2$  metodou Cambureau po 28 dnech. Korelace mezi oběma metodami je velmi dobrá a hodnoty získané oběma metodami jsou ze stejného řádu.

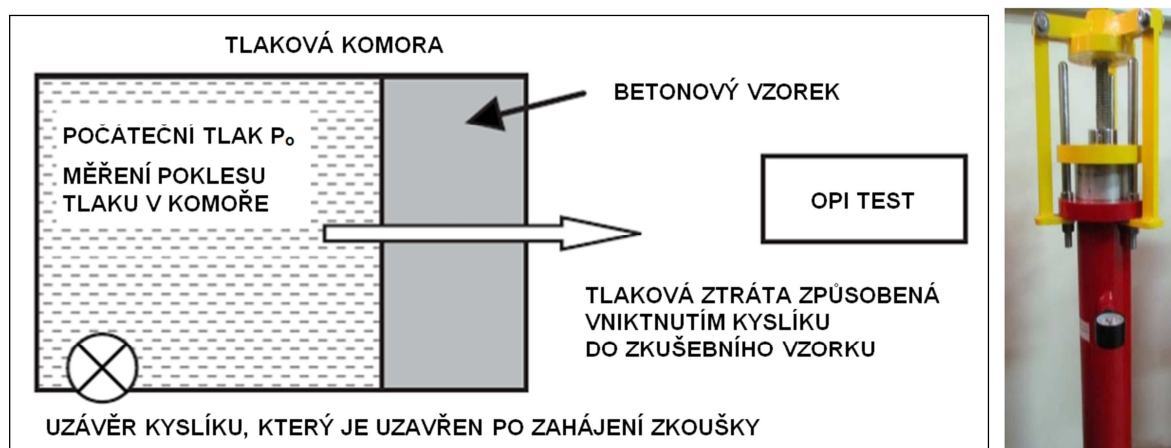
Komerčně se toto zařízení k dispozici u Wexham Developments, Reading, Velká Británie s obchodním názvem „Parrott Permeability Test Kit“ (Obr. 46) [2].



Obr. 46 The Parrott Permeability Test Kit [19]

### 2.3.2.7 OPI Test (*The South African Oxygen permeability index test*)

Jihoafrická zkouška stanovení propustnosti kyslíku je ryze laboratorní zkouškou, neboť je prováděna na vývrtech o průměru 68 mm a výšce 25 mm. Vzorky se vloží do hlavy zkušebního přístroje a sleduje se tlakový pokles kyslíku v čase. Sedm dní před provedením zkoušky je ale nutné zkušební vzorek uložit do sušící komory při teplotě 50°C. Index propustnosti kyslíku je definován jako záporný logaritmus koeficientu propustnosti. Zkouška je hodně citlivá na makro dutiny a trhliny, problematické je také měření u okraje vzorků. Jedná se o obdobnou zkoušku jako je Cembureau test. [22]



Obr. 47 Schéma OPI Testu [22] a pohled na zařízení [67]

Tab. 14 Hodnocení kvalita betonu – test OPI [67]

| OPI index  | Kvalita betonu |
|------------|----------------|
| > 10       | velmi dobrá    |
| 9,5 až 10  | dobrá          |
| 9,0 až 9,5 | špatná         |
| < 9        | velmi špatná   |

### 2.3.2.8 Paulmann

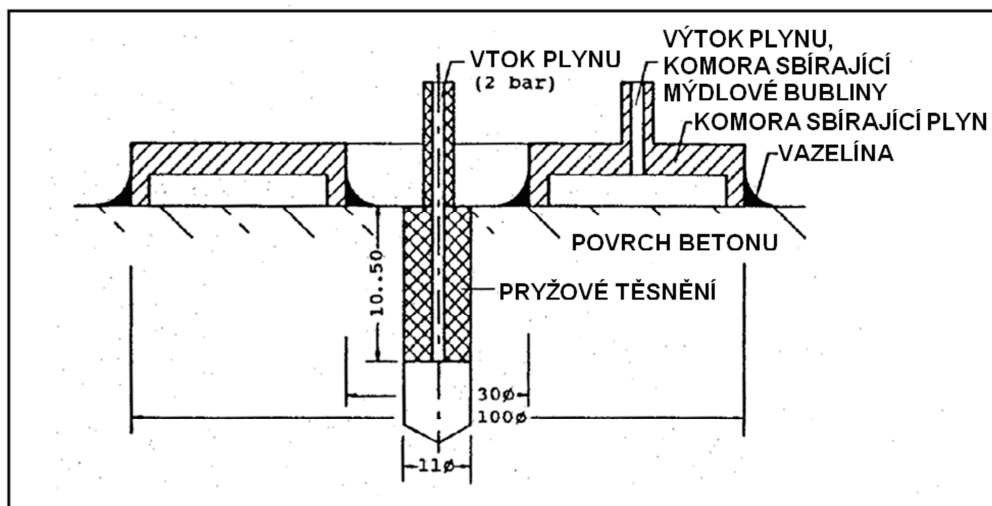
Tato metoda byla vyvinuta K. Paulmannem na Technické universitě v Německu, v Braunschweigu.

Do povrchu betonu se vyvrtá malý otvor o průměru 11 mm a hloubky 40 – 45 mm. Ústí otvoru je utěsněno expandující pryžovou zátkou a měřicí zařízení ve tvaru prstence se utěsní vazelínou. Zkušební otvor je vystaven přetlaku 2 bar dusíkem nebo vzduchem. Měří se čas, který je potřeba k relativnímu nárůstu tlaku v otvoru z 0,2 mbar na 0,5 mbar. Tok vzduchu proudící do betonu, který obklopuje otvor, se shromažďuje v kruhu a měří se průtokoměrem, který může být použit pro výpočet koeficientu propustnosti. Tvrdí se, že metoda Paulmann je



určená pouze pro zkoušení vzduchové propustnosti a funguje pouze za ustálených podmínek.

K této metodě je velmi omezené množství informací, zejména se jedná o nedostatek informací o výkonu tohoto zařízení. Opakovatelnost měření je srovnatelná s jinými metodami. Není známo, že by bylo toto zařízení komerčně dostupné.

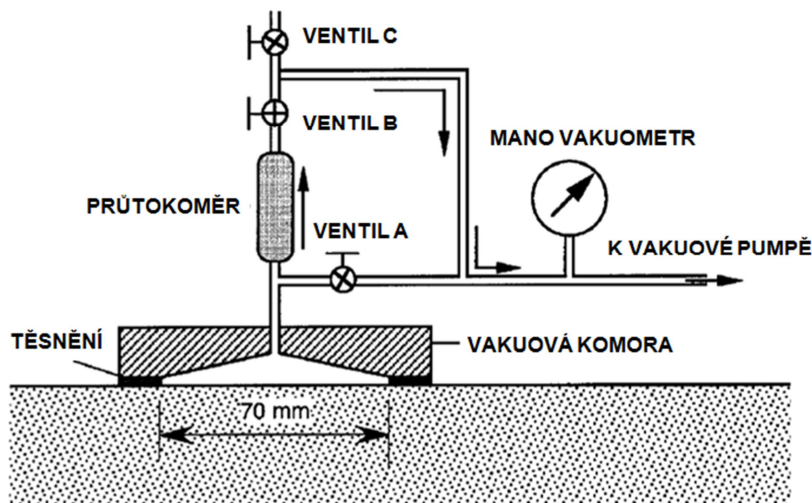


Obr. 48 Schéma Paulmann [2]

### 2.3.2.9 SAF (Surface Airflow Test)

Metoda se používá v rámci ropného průmyslu pro rychlé stanovení propustnosti hornin a skalních jader (Whiting a Cady 1992).

Vakuová komora je umístěna na povrchu betonu a měkký gumový kroužek zajišťuje vzduchotěsné těsnění. Pro provedení zkoušky jsou uzavřeny ventily A, B, a C a spustí se vakuová pumpa. Vývěva je schopna stabilizovat podtlak na cca -83 kPa do 15 s. Ventil A se otevře a podtlak by měl znovu stabilizovat na -83 kPa. Ventil B je otevřen a ventil A se



Obr. 49 Schéma metody SAF test [57] – vzduchová propustnost

uzavře, čímž se řídí proudění vzduchu přes průtokoměr. Po 15 sekundách je prováděno, čtení na průtokoměru. Průtok v ml / m je indikátorem průvzdušnosti povrchu.

Experimenty ukázaly, že účinná hloubka měření je asi 13 mm. Stejně jako v testu Schönlin, povrch by měl být vysušen horkým vzduchem, je-li podezření, že povrchová vrstva může mít vysoký obsah vlhkosti.

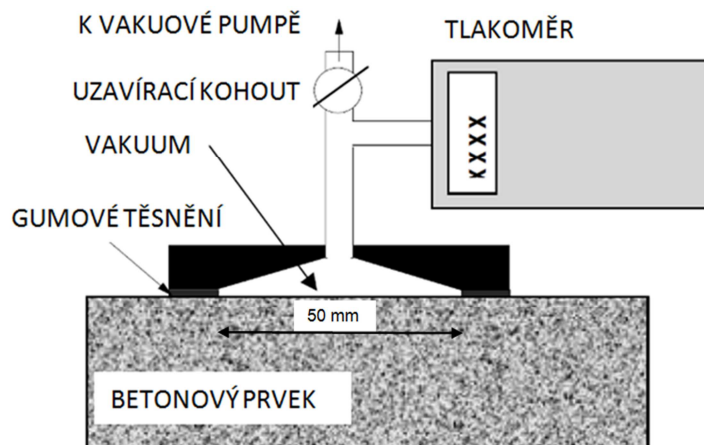
### 2.3.2.10 Schönlin

Tato nedestruktivní metoda byla vyvinuta nezávisle a téměř současně v Německu i ve Francii. Nejdříve ji však dokončili na Technické univerzitě Karlsruhe v Německu, poté ve francouzské laboratoři des Ponts et Chaussées.

Měřicí zařízení se skládá z měřicí buňky o průměru 50 mm s pryžovým těsněním (pro utěsnění na povrchu betonu se spojuje silikonem), vývěvy a tlakoměru s uzavíracím kohoutem. Vnější atmosférický tlak stlačuje buňku na povrchu betonu a vytváří těsnou vakuovou komoru. V měřicí buňce se vytvoří určité vakuum, kohout se uzavře a měří se čas, kdy se zvýší tlak 50 – 300 mbar. Ve snaze zajistit stejné podmínky při měření, Schönlin a Hilsdorf (1987) navrhli povrch betonu 5 min před testem sušit horkým vzduchem. Metoda je extrémně rychlá (jedna zkouška trvá 3 minuty) a může být provedena jen jediným pracovníkem. U velmi těžkých betonů je interval měření 120 s. Variační koeficient u této metody je cca 3 %. Výsledky měření jsou ovlivněny pouze povrchovou vrstvou betonu a způsobem ošetřování. Metodou nelze zjistit koeficient propustnosti, ale zjišťuje se index propustnosti, který je definován jako podíl rychlosti proudění dovnitř komory a průměrem komory:

$$M = \frac{(P_1 - P_0) \cdot V_e}{(t_1 - t_0) \cdot P_a} \cdot \frac{1}{P_a - (P_1 + P_0) / 2} \left[ m^2 / s \right], \text{ kde} \quad (19)$$

$M$ ...index permeability [ $m^3/s/mbar$ ],  $P_a$ ...atmosférický tlak [ $mbar$ ],  $P_0$ ...počáteční tlak [ $mbar$ ],  $P_1$ ...konečný tlak [ $mbar$ ],  $t$ ...čas [ $s$ ],  $V_e$ ...objem komory a příslušenství [ $m^3$ ].



Obr. 50 Schéma Schönlina testu dle [2]

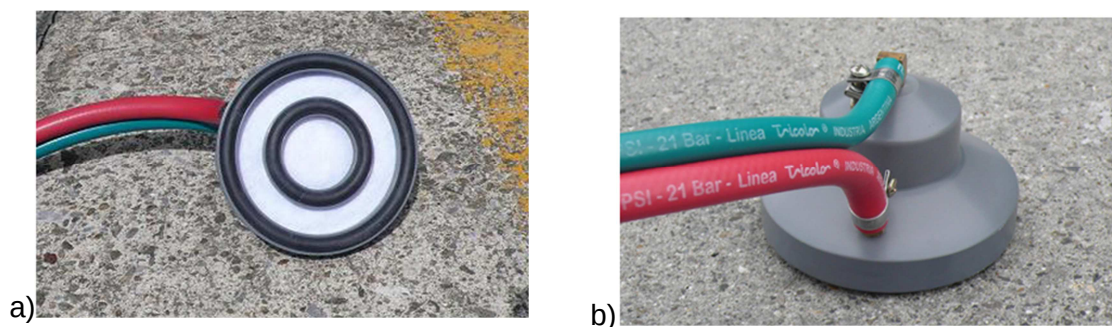
### 2.3.2.11 Permea-TORR

Tato metoda vychází z metody dr. Torrenta a navázala tak na velmi úspěšné zkušební zařízení TPT, které je používáno více než 15 let.



Obr. 51 Metoda Permea-TORR [60]

Zařízení se skládá z dvoukomorové buňky a při měření se postupuje následovně: Po spuštění zařízení je uzavřen elektrický ventil 2 poté, co je dosažen podtlak 30 kPa, a pneumatický systém vnitřní komory (obrázku označen zeleně) je napájen z vývěvy. Vzduch, který je obsažen v pórech povrchové vrstvy betonu protéká krycí vrstvou do vnitřní komory se současným zvýšením tlaku  $P_i$ . Rychlost nárůstu tlaku  $P_i$  je přímo úměrná koeficientu vzduchové propustnosti povrchové vrstvy.

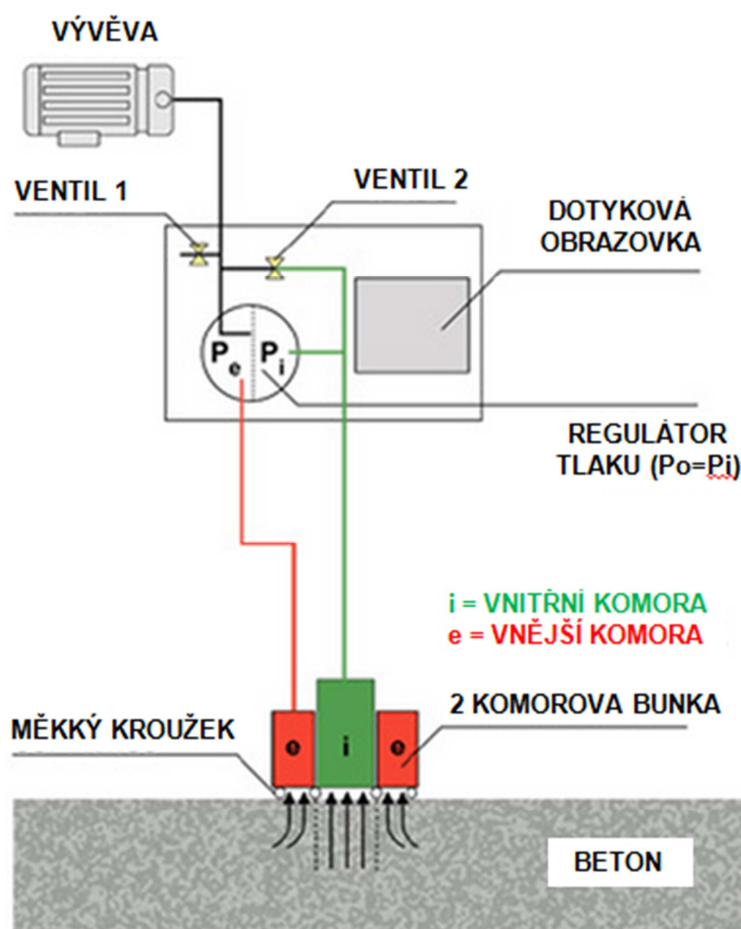


Obr. 52 Dvoukomorová měřící buňka přístroje Permea-TORR, a) spodní pohled, b) horní pohled [60]

Regulátor tlaku udržuje tlak vnější komory trvale vyvážený s komorou vnitřní ( $P_e = P_i$ ). Jedná se o řízený jednosměrný tok do vnitřního prostoru a koeficient prostupnosti vzduchu  $k_T$  [ $\text{m}^2$ ] lze vypočítat podle následujícího vzorce, odvozeného modelováním zkušebních podmínek:

$$k_T = \left( \frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left( \frac{\ln \left( \frac{P_a + \Delta P_i(t_f)}{P_a - \Delta P_i(t_f)} \right)}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_o}} \right)^2, \text{ kde} \quad (20)$$

$k_T$ ...koeficient vzduchové permeability [ $\text{m}^2$ ],  $V_c$ ...objem ve vnitřní komoře buňky [ $\text{m}^3$ ],  $A$ ...zkušební plocha v příčném řezu vnitřní komory [ $\text{m}^2$ ],  $\mu$ ...viskozita plynu [ $= 2,0 \cdot 10^{-5} \text{N.s.m}^{-2}$ ],  $\varepsilon$ ...odhad porozity povrchové vrstvy betonu [ $= 0,15$ ],  $P_a$ ...atmosférický tlak [ $\text{N.mm}^{-2}$ ],  $\Delta P_i$ ...tlak ve vnitřní komoře na konci zkoušky [ $\text{N.mm}^{-2}$ ],  $t_f$ ...čas na konci zkoušky [ $\text{s}$ ],  $t_o$ ...čas na začátku zkoušky [ $= 60 \text{ s}$ ].



Obr. 53 Schéma metody Permea-TORR [60]

Vývoj metody provázely tyto klíčové momenty:

- Vynález metody Dr. R. Torrent ve Švýcarsku (1991).
- Získání grantu od švýcarského ministerstva dopravy (1992-2006).

- Vývoj a zahájení komerčního prodeje zařízení "Torrent Propustnost Tester" společností PROCEQ SA (1993).
- Zahrnutí metody mezi švýcarské standardizované metody (vzduchová propustnost na konstrukci) v SIA 262/1: Betonové konstrukce - doplňující údaje (2003).
- Metoda doporučená RILEM TC 189-NEC, "Nedestruktivní hodnocení povrchové vrstvy betonu" (2005).
- Vývoj a zprovoznění nové generace přístroje s názvem Permea-Torr (2008).

Švýcarská norma SIA 262/1-E: 2003 - "Betonové konstrukce" uvádí: "Nepropustnost krycího betonu musí být kontrolována pomocí zkoušky propustnosti (např. měření propustnosti pro vzduch) na konstrukci nebo odběrem základních vzorků".

Přístroj Permea-TORR splňuje požadavky švýcarské normy, tj. je určen k měření propustnosti vzduchu na povrchové vrstvě betonu. Výsledky švýcarské standardní metody dobře korelují s dalšími souvisejícími zkouškami trvanlivosti, jako např. RCPT (ASTM C1202), pronikání vody (EN 12390-8), propustnost (RILEM Cembureau), kapilárního sání (ASTM C1585). Metoda je tedy použitelná i pro jiné velmi pórovité materiály, jako je kámen, pálené hlína, keramika, atd.

Přístroj Permea-TORR je konstruován odlišně proti TPT o tyto zlepšení:

1. Je rychlejší; nová verze software umožňuje dokončit test během 2 až 6 minut namísto předchozích 12 minut.
2. Kalibrace a zkouška je plně automatizovaná, tj. jakmile je aktivována klávesa "Start", může obsluha provádět další úkoly, dokud PermeaTORR nepípne, že měření bylo dokončeno.
3. Je kompaktní a lehký (vejde do kufříku hmotnosti  $\approx 9$  kg).
4. Fungování a různé funkce jsou aktivovány pomocí počítače s dotykovou obrazovkou, který také zobrazuje výsledky.
5. Přístroj umožňuje měření i na velmi namáhaných částech konstrukce (např. úzké sloupy, východní strana), a jsou také odstraněna některá předchozí omezení (např. možnost měření až do vzdálenosti 2,52 m od nohy, avšak nejméně 100 mm od levého okraje).
6. Přístroj měří tlak obou komor, takže může být sledován spolehlivý provoz systému. Měří se také teplota.
7. Rozšířený rozsah měření – umožňuje měření i velmi porézních materiálů (klasifikace PK6), jako jsou některé kameny a pálené tašky.
8. Umístění prachových filtrů v obou komorách vakuové buňky.
9. Grafický záznam nárůstu tlaku ( $\Delta P_i - t^{1/2}$ ), umožňuje předběžný odhad hodnoty  $k_T$ .
10. V paměti přístroje může být uloženo až 1000 měření a lze je stáhnout do PC.
11. Statistické vyhodnocení dat (logaritmický průměr a směrodatná odchylka).

12. Pokročilé funkce poskytují plnou kontrolu testu a výpočet  $k_T$  za zvláštních podmínek (např. tenké prvky).

13. Software může být aktualizován s cílem zlepšit fungování a přizpůsobit se budoucím požadavkům.

Oproti metodě TPT došlo také k nové klasifikaci výsledků, kdy přibyla nová třída PK6 (viz Tab.15).

Tab. 15 Klasifikace výsledků dle Permea-TORRRu [60]

| Třída | $k_T \cdot 10^{-16} [\text{m}^2]$ | Propustnost      |
|-------|-----------------------------------|------------------|
| PK1   | < 0,01                            | velmi nízká      |
| PK2   | 0,01 – 0,1                        | nízká            |
| PK3   | 0,1 – 1                           | střední          |
| PK4   | 1 – 10                            | vysoká           |
| PK5   | 10 – 100                          | velmi vysoká     |
| PK6   | > 100                             | mimořádně vysoká |

Permea-TORR měří koeficient vzduchové propustnosti  $k_T$  za stávajících podmínek vlhkosti. Vzhledem k tomu, že obsah vlhkosti povrchové vrstvy betonu může mít vliv  $k_T$ , je vhodné určit obsah vlhkosti před každým měřením.

Přístroj je komerčně dostupný u společností Proceq nebo Mastrad.

#### **2.3.2.12 TPT (Torrent Permeability Tester)**

Pro stanovení součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  se používá přístroj TPT. Toto švýcarské zařízení vyráběné firmou Proceq se skládá z dvoukomorové vakuové buňky, regulátoru tlaku který koriguje proudění vzduchu do vnitřní komory orientované kolmo k povrchu zkoušené konstrukce, z vakuového čerpadla a ovládací jednotky. Více o této metodě je uvedeno v následujících kapitolách.

Přístroj je komerčně dostupný u společností Proceq nebo Mastrad.

#### **2.3.2.13 TUD (Technical University of Delft)**

Tato metoda byla vyvinuta H. W. Reinhardtem, J. Mijnsbergenem a J. H. Croesem na Technické universitě v Delftu v Nizozemí.

Válcová dutá sonda se zavádí do spodní části vyvrtaného malého otvoru o průměru 10 mm a hloubce 40 mm. Pro utěsnění otvoru se používá gumový kroužek, který je součástí sondy. Tlak je nastaven stlačováním kruhu, čehož dosáhneme dotažením šroubovou maticí. Jakmile se komora utěsní, do zkušebního otvoru se skrz sondu zavádí plyný dusík při tlaku 10 až 10,5 bar. Při dosažení potřebného tlaku se uzavře přívodní kohout **plynného dusíku** a

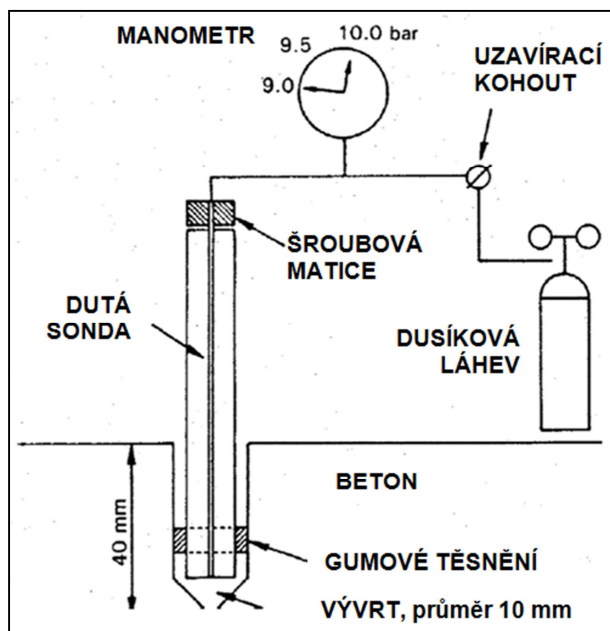


stopuje se čas, kdy dojde k poklesu tlaku z 10 bar na 9,5 bar. Tento čas je zaznamenán jako výsledek testu.

Doba trvání zkoušky i další poznatky jsou podobné jako u metody Poroscope, avšak TUD umožňuje rychlejší utěsnění otvoru a montáž sondy.

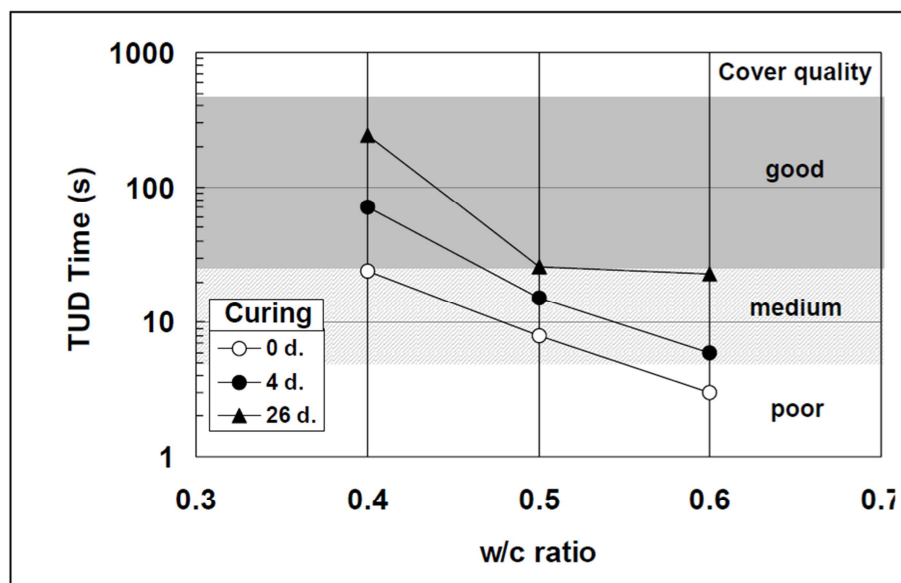
Opakování měření ve stejném otvoru změří v podstatě stejný výsledek, tzn. pro jeden otvor je dostatečné jedno měření. Koeficient variability je 15,8 % a tato hodnota je srovnatelná s metodou Poroscope, kde je udáván koeficient variability 13,2 %. [2]

Následující obrázek ukazuje velmi důležité údaje o této metodě. Zejména se jedná o klasifikaci povrchové vrstvy betonu (dobrá, střední, nízká). Tato



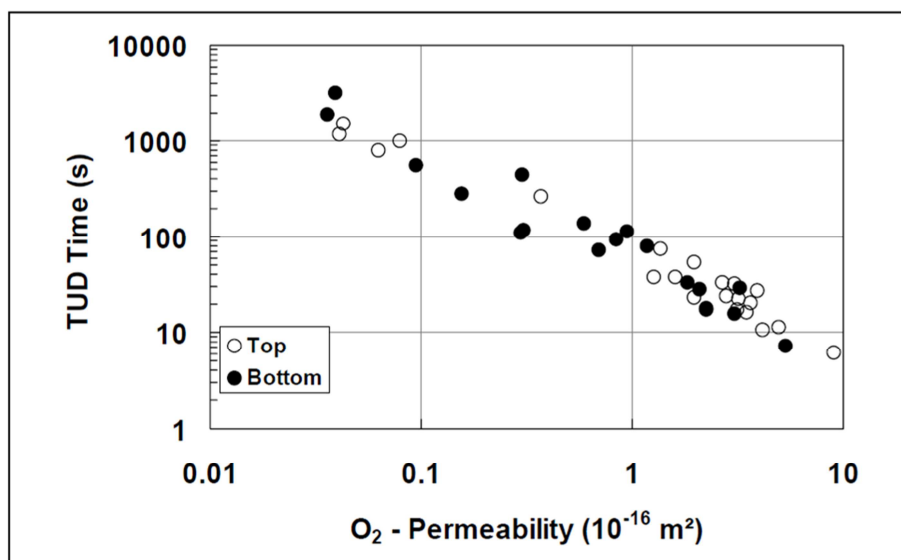
Obr. 54 Schéma metody TUD [2]

metoda byla také srovnávána s metodou Cemberau (propustnost pro O<sub>2</sub>). Výsledky ukazují na velmi dobrou korelaci mezi oběma parametry, kdy časové hodnoty u metody TUD znázorněné na obr. odpovídají poklesu tlaku mezi 10 a 9 bary. Tento přístroj není komerčně dostupný.



Obr. 55 Vliv poměru v/c a době ošetřování na času TUD měření s hodnocení kvality povrchové vrstvy betonu [2]

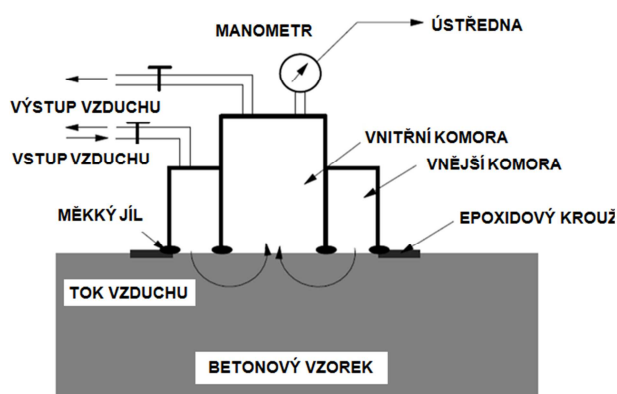




Obr. 56 Vztah mezi časem při měření metodou TUD (TUD time) a propustností stanovenou metodou Cembureau ( $O_2$  permeability) [2]

#### 2.3.2.14 Zia-Guth

Tuto metodu vyvinuli v USA páni Paul Zia a D.L. Guth a byla určená pro stanovení vzduchové propustnosti betonu, kde využívá dráhu proudění vzduchu. Zkušební komora se skládá ze dvou soustředných válcových komor, a jakmile se vytvoří podtlak v obou komorách, vzduch proudí z vnější komory do vnitřní komory přes zkoušený beton. Měří se a zaznamenává se míra zvýšení tlaku ve vnitřní komoře.



Obr. 57 Schéma metody Zia-Guth [2]



Obr. 58 Typické rozložení zařízení Zia-Guth při zkoušení betonových desek [62]

Zkušební postup je následující: Po výběru testovací oblasti se na povrch betonu umístí kruhová šablona a utěsní se vrstvou rychle tuhnoucího epoxidu na vnější straně označeného kruhu o šířce 38 mm. Po vytvrzení epoxidu (max. 20 min) se pod spodní okraj komor umístí pás z měkkého jílu a celé zařízení se pevně usadí na povrchu betonu.

Test je zahájen použitím vakua asi 2 kPa v obou komorách, po 15 minutách se ve vnitřní komoře ventil uzavře pro utěsnění vakua. Vzduch proudí vnější komorou a sleduje se

zvýšení tlaku ve vnitřním prostoru po dobu 1 hodiny. Výstupem testu je křivka závislosti tlaku na čase. S cílem získat jeden parametr jako výsledek zkoušky, autoři provedli numerické modelování simulující podmínky testu s různými koeficienty propustnosti betonu. Při porovnání naměřeného tlaku v závislosti na čase s teoretickými křivkami je možné přiřadit koeficient permeability  $k$  [ $\text{m}^2$ ].

Před každou zkouškou se otestuje těsnost na ocelové desce z důvodu odstranění případných netěsností a zaznamenává se zvýšení tlaku ve vnitřním prostoru. Tento případný únik je pak odečten od získaných údajů z následujících testů na konkrétních vzorcích.

Tab. 16 Kategorie betonu podle Zia-Guth metody [2]

| Stupeň betonu                                                   | stupeň A | stupeň B | stupeň C |
|-----------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Konstanta vzduchové propustnosti $k$ [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ] | < 3      | 3 - 6    | > 6      |

## 2.4 SROVNÁVACÍ TESTY

V posledních desítkách let probíhají rozsáhlé výzkumy a porovnání metod mezi sebou a byly stanoveny variační koeficienty, které jednotlivé metody srovnávají. Variační koeficient stanovili p. Torrent a p. Edensperger [2] na 11 typech betonových desek z obou stran. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 17.

Tab. 17 Srovnání variačních koeficientů jednotlivých metod při měření Torrenta a Edenspergera [2]

| Metoda                  | Cembureau | Poroscope | Schönlín | Torrent | TUD  |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|---------|------|
| Variační koeficient [%] | 8,2       | 13,2      | 2,7      | 6,6     | 15,8 |

Podobných výsledků bylo také dosaženo měřením p. Gonçalvesem a p. Nevesem [2], kdy při jejich srovnávacích testech variační koeficient odpovídá průměru 3 měření na 3 různých druzích betonů a reprezentují variabilitu mezi různými vzorky betonů.

Tab. 18 Srovnání variačních koeficientů jednotlivých metod při měření Gonçalvesa a Nevese [2]

| Metoda                  | Cembureau | Poroscope | Schönlín | Parrott | Paulmann |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|---------|----------|
| Variační koeficient [%] | 38,8      | 35,8      | 26,4     | 41,9    | 34,0     |
| Počet měřících sérií    | 35        | 10        | 15       | 15      | 18       |

### 3 CÍL PRÁCE

Trvanlivostí rozumíme schopnost konstrukce odolávat účinkům prostředí, ve kterém se nachází a to po celou dobu životnosti betonové konstrukce. Pod pojmem aktuální trvanlivosti rozumíme stav konstrukce v měřený okamžik - dnes. Při hodnocení trvanlivosti musíme patřičně vyhodnotit návrh a výrobu konstrukce, kvalitu údržby a také musíme znát přesné environmentální podmínky, jimž byla konstrukce od jejího vzniku vystavena. Aby toto vyhodnocení bylo objektivní, existuje soubor tzv. trvanlivostních charakteristik, které hodnotí povrchovou vrstvu betonu v tloušťce 20 ~ 60 mm. I když na hodnocení trvanlivosti neexistuje jednoznačný názor, mnoho vědeckých pracovišť se shoduje na tom, že pórovou strukturu povrchové vrstvy betonu nejlépe vystihují zkoušky propustnosti. Tato práce se zabývá hodnocením povrchové vrstvy betonu zkouškami propustnosti pro vzduch a vodu jako podklad pro odhad jeho aktuální trvanlivosti.

Problematikou propustnosti povrchových vrstev betonu se zabývá stále více vědeckých pracovišť po celém světě. Domnívají se, že pomocí těchto zkoušek lze nejlépe popsat pórovou strukturu betonu a hodnotit tak kvalitu povrchové vrstvy (20–60 mm) a tím i nepřímo trvanlivost betonu. V roce 2007 byla vydána kniha s názvem „Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover“ od autorského kolektivu R. Torrent a L. F. Luco, ve které jsou nejen popsány jednotlivé metody pro zkoušení permeability, ale také zveřejněny výsledky srovnávacích testů těchto přístrojů. Autoři se však zaměřili jen na některé metody a srovnávací testy nebyly provedeny na všech typech měřicích zařízení. A právě na tuto problematiku bych ráda navázala.

Cílem této práce je vytvořit přepočtové vztahy mezi metodami pro hodnocení propustnosti povrchových vrstev betonu a umožnit tak orientační hodnocení povrchové vrstvy betonu a tím i nepřímo trvanlivost betonu. Srovnávány budou tři metody: TPT (Torrent Permeability Tester), GWT (Germanns Water Permeability Tester) a ISAT (Initial Surface Absorption Test).

Dosud nejvíce používanou metodou na ÚSZK VUT v Brně je metoda TPT, pro kterou byl již vyvinut „Standardní operační postup pro přepočet hodnoty součinitele vzduchové propustnosti vzhledem k aktuální vlhkosti“ [43]. Cílem prvních měření propustnosti bylo seznámit se s měřicími přístroji a zjistit jejich rozsah i omezení, a v dalších fázích se zaměřit na vytvoření přepočtových součinitelů i pro další metody, tj. GWT a ISAT, což umožní porovnávání výsledků měření při různých vlhkostech zkušebních těles.

Další měření byla zaměřena na vytvoření přepočtových vztahů, které umožní při použití jedné metody přibližně určit s danou odchylkou, jak by byl daný betonový povrch hodnocen zkouškou jinou. Pro hodnocení povrchové vrstvy betonu pak nebude zapotřebí 3 metod, ale postačí pouze jedna.

Pro metody ISAT ani GWT není dosud vytvořena jednotná metodika. Dílčím cílem práce bylo vytvořit jednotnou metodiku pro měření s přístrojem GWT i metodou ISAT, a stanovit tak jednotná kritéria při práci s přístroji.

## 4 METODIKA PROVÁDĚNÝCH PRACÍ

Vypracování disertační práce bylo rozčleněno do 7 na sebe navazujících etap a každé z nich byla věnována velká pozornost:

- **ETAPA 1 – podrobné seznámení s měřicími přístroji**

První etapa byla zasvěcena podrobnému seznámení se s měřicími přístroji dostupnými na ÚZSK VUT v Brně, a to konkrétně s přístroji TPT (Torrent Permeability Tester), GWT (Germanns Water Permeability Tester), vlhkoměrem KAKASO (PSMXi) a metodou ISAT (Initial Surface Absorption Test). Na prvních dlaždicích a kvádrech byl zjištěn rozsah jejich použití i omezení při experimentálním měření.

- **ETAPA 2 – návrh veličin pro experimentální sledování**

Na základě zkušeností z první etapy byly v druhé etapě navrženy veličiny pro experimentální sledování a také stanoveny výzkumné projekty, ze kterých budou naměřené veličiny získány. Vzhledem k velkému množství prováděných výzkumných činností za účelem vytvoření přepočtových vztahů byly pro disertační práci vybrány pouze ty, které ukazovaly na pozitivní závěry.

- **ETAPA 3 – návrh a množství zkušebních těles, receptury, uložení**

V rámci třetí etapy byl proveden návrh zkušebních těles, kdy na základě zkušeností výzkumných pracovníků [42] byly jako optimální vybrány dlaždice o rozměrech 300x300x80 mm. Množství zkušebních těles pro experimentální sledování bylo voleno s ohledem na minimální množství výsledků nutných k vytvoření přepočtových vztahů. Dále byly vybrány receptury betonů zaručující dobrou zpracovatelnost. Také byla stanovena doba uložení zkušebních těles, po jejímž uplynutí bylo měření prováděno.

- **ETAPA 4 – výroba zkušebních tělesa a způsob jejich zrání**

Náplní čtvrté etapy byla samotná výroba zkušebních těles (zejména v laboratořích ÚZSK VUT v Brně), kdy se dbalo zejména na výslednou kvalitu povrchové vrstvy. Je také popsáno prostředí, ve kterém zkušební tělesa zrál a kde byla před samotným měřením umístěna.

- **ETAPA 5 – experimentální měření**

V páté etapě bylo provedeno samotné experimentální měření, které probíhalo v laboratořích ÚZSK VUT v Brně. Na jednom zkušebním místě byly stanoveny 3 experimentální měření, a to buď stanovení povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  přístrojem TPT a počáteční povrchové absorpce  $ISA$  metodou ISAT a nebo byla místo hodnoty  $ISA$  stanovena vnitřní propustnost  $k_1$  přístrojem GWT. Tento postup byl zvolen s ohledem na porovnatelnost výsledků mezi sebou.

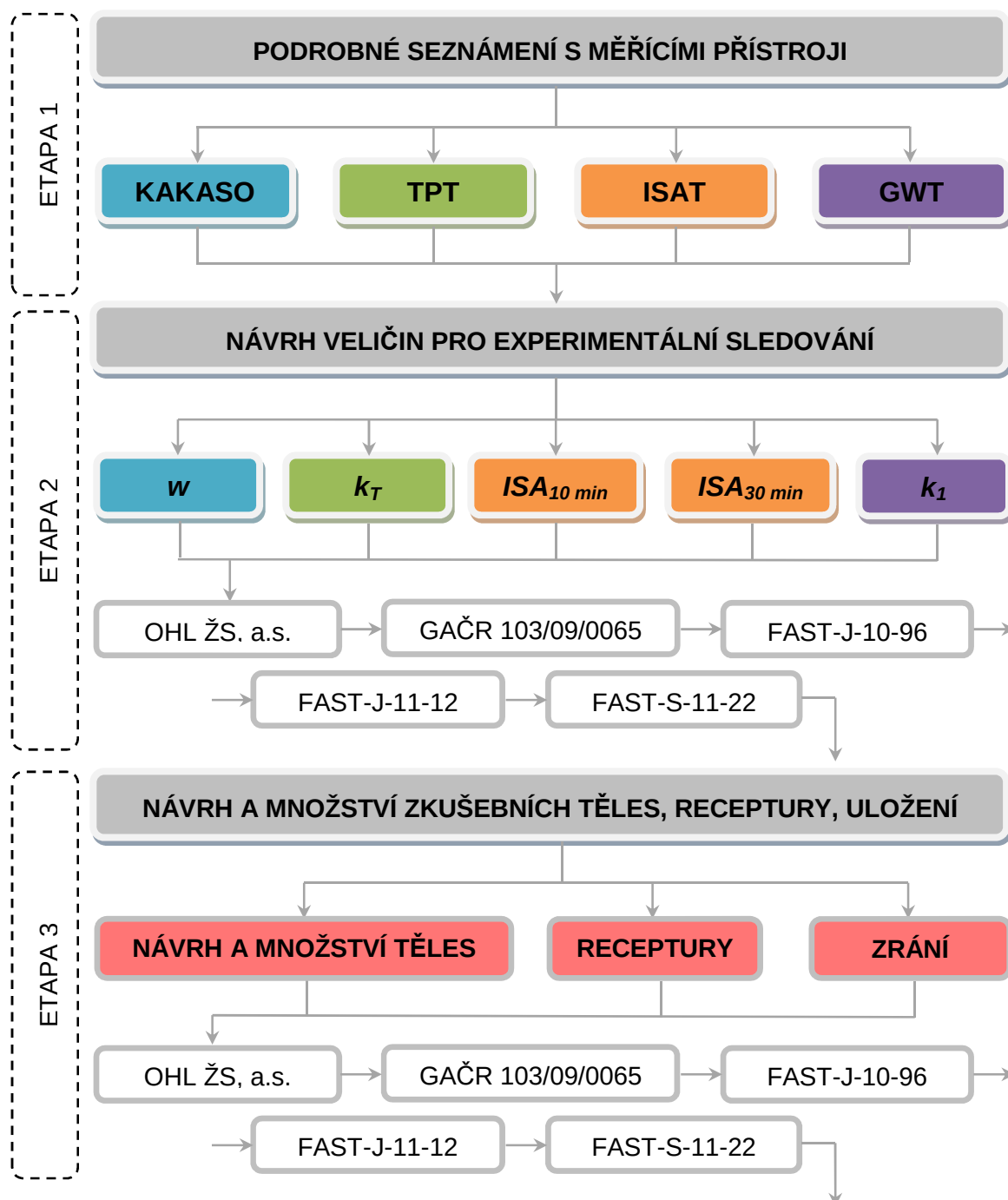
- **ETAPA 6 – zhodnocení naměřených dat**

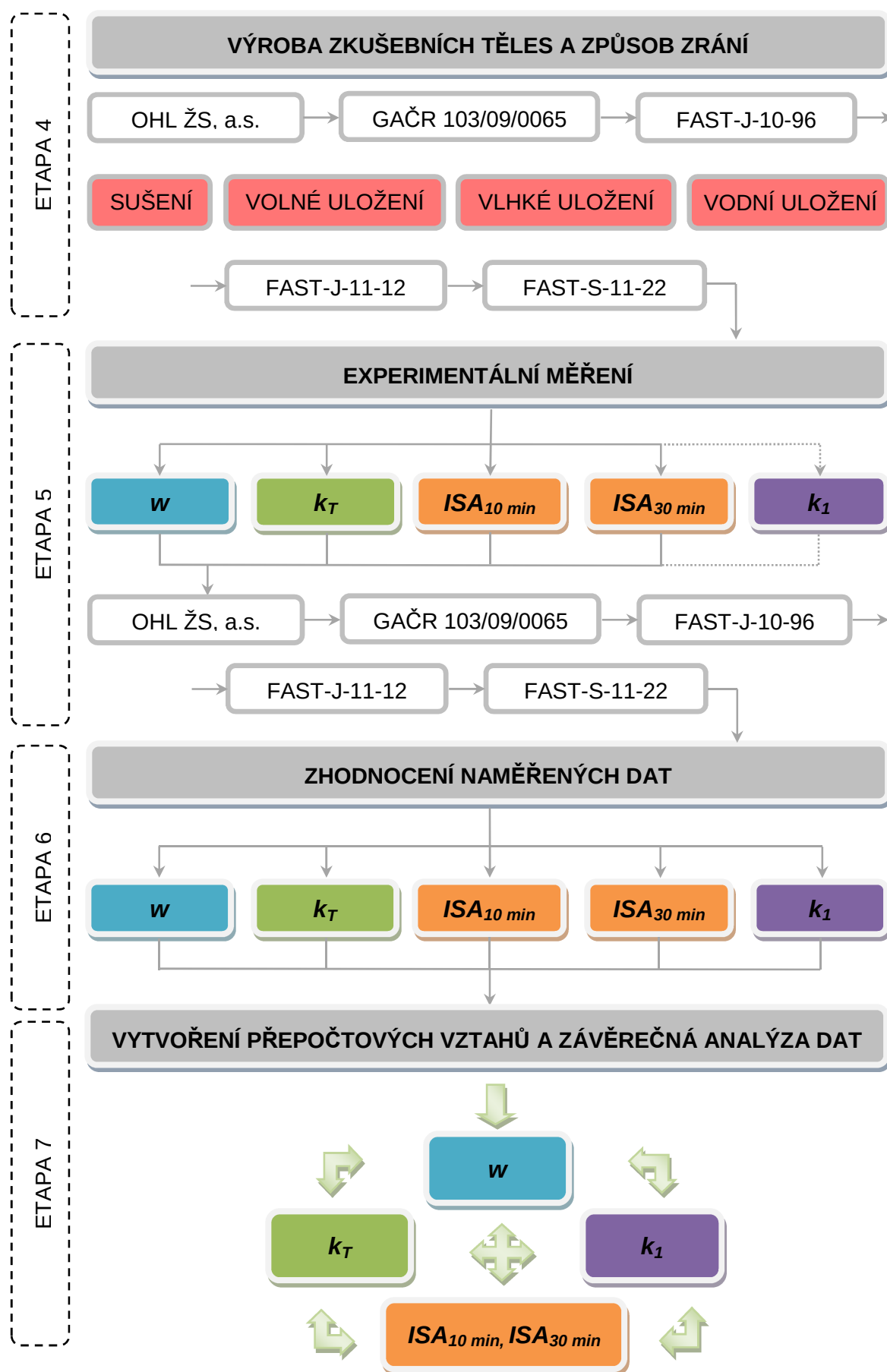
Šestá etapa byla věnována zhodnocení naměřených dat, kde bylo stručně shrnuto, jakých závěrů bylo experimentálním měřením dosaženo.

- **ETAPA 7 – vytvoření přepočtových vztahů a závěrečná analýza dat**

Nejdůležitější etapou celého výzkumu bylo vytvoření přepočtových vztahů v programu MATLAB, kde byly vytvořeny nové vzorce pro přepočet hodnot  $ISA$  při aktuální povrchové vlhkosti na srovnávací 3% vlhkost a také vztahy mezi hodnotou  $k_T$  a hodnotou  $ISA$ . Závěrečná analýza dat souhrnně uvádí přehled získaných přepočtových vztahů.

Jednotlivé etapy jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku.





Obr. 59 Schéma etap disertační práce



## 5 POSTUP PRACÍ V JEDNOTLIVÝCH ETAPÁCH

V následujících kapitolách bude podrobně rozebrána každá etapa mého výzkumu.

### 5.1 ETAPA 1 – PODROBNÉ SEZNÁMENÍ S MĚŘICÍMI PŘÍSTROJI

První etapa byla věnována podrobnému seznámení se s měřicími přístroji TPT, GWT, ISAT a KAKASO, a také byla prozkoumána problematika propustnosti povrchové vrstvy betonu, proběhla rekognoskace výzkumu na ostatních pracovištích (převážně zahraničních, v ČR není mnoho přístrojů pro měření propustnosti). Před zahájením měření proběhlo seznámení s obsluhou přístrojů a také byla ověřena dostupnost dalších přístrojů pro měření propustnosti.

Existuje mnoho metod, které se používají pro měření permeability (viz kapitola 2.3), avšak na Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně jsou k dispozici tyto 3 měřicí zařízení, se kterými bylo měření prováděno:

- Přístroj TPT – Torrent Permeability Tester
- Přístroj GWT – Germanns Water Permeability Tester
- Metoda ISAT – Initial Surface Absorption Test
- Vlhkoměr KAKASO (PSMXi).

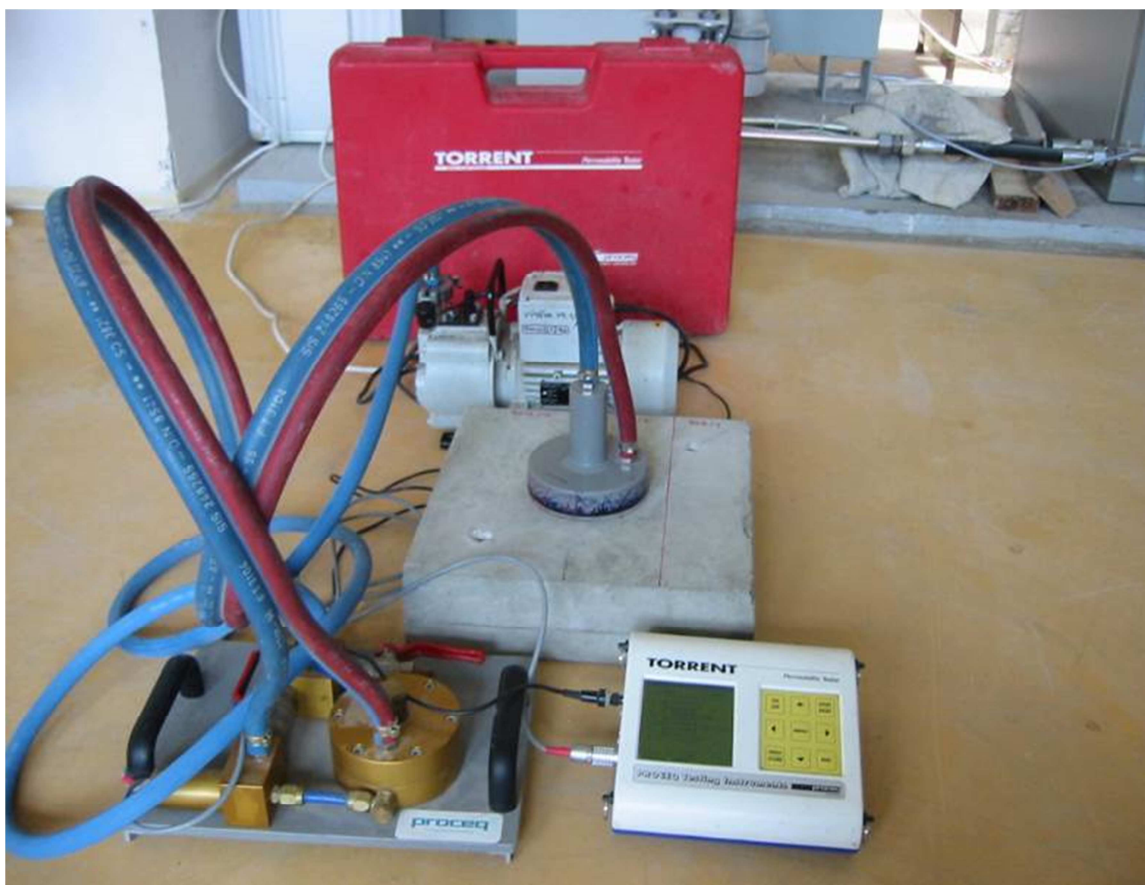
#### 5.1.1 TPT (Torrent Permeability Tester)

Tato metoda byla vyvinuta společností „Holderbank Management and Consulting Ltd“ (dnes Holcim Group Support s.r.o.) ve Švýcarsku a postupem času byla vylepšována (Torrent 1992; Mastrad Limited 2009; Proceq 2009).

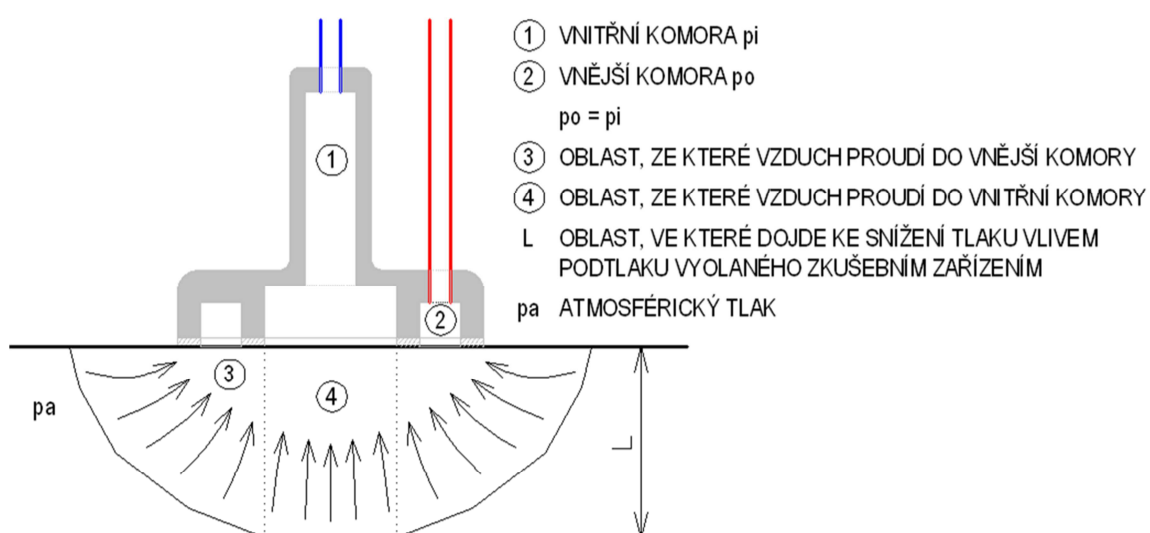
Zařízení se skládá z (Obr. 60):

- dvoukomorové vakuové buňky, vnitřní o průměru 32 mm a vnější o průměru 86 mm, která je orientovaná kolmo k povrchu zkušebního místa,
- regulátoru tlaku, který vyrovnává tlak ve vnitřní a vnější komoře,
- vakuového čerpadla,
- digitální ovládací jednotky.

Čerpadlo vytváří ve vnitřní komoře a vzorku podtlak  $P_i$  ( $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a zkouška spočívá v měření proudění vzduchu (v čase) do vnitřní komory přístroje TPT. Aby nebyl součinitel propustnosti ovlivněn okolní plochou, je součinitel počítán pouze z plochy a vzduchu odsátého pod vnitřní komorou. Vnější komora odsává vzduch z okolního betonu a případný atmosférický, ale nevstupuje do výpočtu. Tlak  $P_e$  ve vnější komoře zajišťuje kontrolované lineární proudění vzduchu do vnitřní komory. Ovládací jednotka elektronicky ovládá tlak ve vnější i vnitřní komoře (tj.  $P_i = P_e$ ). Schéma přístroje je na Obr. 61.



Obr. 60 Pohled na přístroj TPT. Nahoře přenosný červený kufřík, pod ním vývěva, uprostřed snímací vakuová buňka umístěná na betonové dlaždici, vlevo dole regulátor tlaku, vpravo bílá ovládací jednotka s digitálním displejem (archiv Kadlecová)



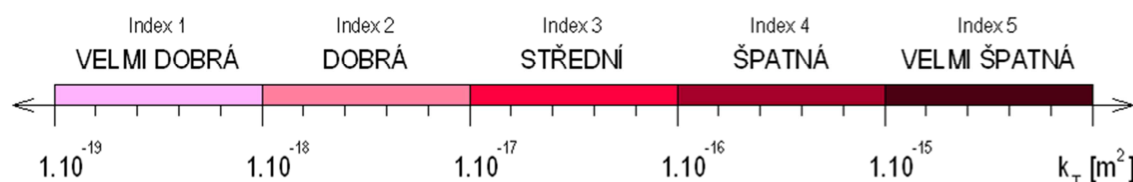
Obr. 61 Schéma přístroje TPT (VZ)

Postup měření: Měřicí buňka se přiloží ke zkušebnímu povrchu, otevře se kohout 1 a z důvodu sání se měřicí buňka přitiskne k povrchu betonu. Po 30 s se otevře kohout 2, zavře se v čase 35 s a znovu uzavře v čase 60 s. V tomto cyklu dojde k vyrovnání tlaků mezi

vnitřní a vnější komorou. Po 1 minutě začíná samotné měření a dochází k nasávání vzduchu pouze pod plochu vnitřní komory. U více porézních betonů proudí do komor více vzduchu. Zkouška končí, když se tlak ve vnitřní komoře zvýší o cca 20 mbar nebo čas měření dosáhne 12 min. Po 2 (vysoká propustnost) až 12ti minutách (nízká propustnost) přístroj určí součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$ , tlakový spád  $\Delta p$  a také hloubku  $L$  (obvykle cca 10 mm při nízké propustnosti a až 100 mm při vysoké propustnosti), do které vakuum vniklo. Propustnost vzduchu se vypočítá podle následující rovnice, kterou vytvořili Torrent & Frenzer [63]:

$$k_T = \left( \frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left( \frac{\ln \left( \frac{p_a + p}{p_a - p} \cdot \frac{p_a - p_o}{p_a + p_o} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_o}} \right)^2, \text{ kde} \quad (21)$$

$k_T$ .....koeficient vzduchové permeability [ $\text{m}^2$ ],  $V_c$ .....objem ve vnitřní komoře buňky [ $\text{m}^3$ ],  $A$ .....zkušební plocha v příčném řezu vnitřní komory [ $\text{m}^2$ ],  $\mu$ .....viskozita plynu [ $= 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ N.s.m}^{-2}$ ],  $\varepsilon$ .....odhad porozity povrchové vrstvy betonu [ $= 0,15$ ],  $p_a$ .....atmosférický tlak [ $\text{N.mm}^{-2}$ ],  $p_o$ .....tlak ve zkušební komoře na začátku zkoušky v čase  $t_o$  [ $\text{N.mm}^{-2}$ ],  $p$ .....tlak ve zkušební komoře na konci zkoušky v čase  $t$  [ $\text{N.mm}^{-2}$ ],  $t_o$ .....čas na začátku zkoušky [ $= 60 \text{ s}$ ],  $t$ .....čas na konci zkoušky [ $\text{s}$ ].



Obr. 62 Klasifikace kvality povrchové vrstvy betonu dle dr. Torrenta (VZ dle [2])

Experimentální měření prokázala [42], že není vhodné provádět měření na krychlích o rozměrech 150x150x150 mm, i když je formálně splněn požadavek výrobce na umístění vakuové buňky min. 20 mm od okraje. Jedním z důvodů byl důraz na přesnost umístění na krychlích a dále také skutečnost, že vzdálenost 20 mm mezi vakuovou buňkou a okrajem se zdála být nedostatečná vzhledem k materiálu, který má pórovitou strukturu a mohou se objevit tlakové ztráty bočními stranami krychle.

Časový interval mezi jednotlivými měřeními na totožném místě je 30 min.

Podle autorů zařízení je hlavním faktorem, který ovlivňuje výsledky měření, vlhkost. Z tohoto důvodu se postupuje různě u suchých a vlhkých betonů.

U suchého betonu lze třídu kvality krytí výztuže vyčíst z následující tabulky pomocí hodnoty  $k_T$  a výsledky jsou v souladu s jinými laboratorními metodami, jako např. propustnost pro  $\text{O}_2$ , stanovení absorpční kapacity kapilární vody, propustnost pro chloridy a další.

| Kvalita krycí vrstvy betonu | Index | $k_T$ ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) |
|-----------------------------|-------|----------------------------------|
| Velmi špatná                | 5     | $> 10$                           |
| Špatná                      | 4     | $1.0 - 10$                       |
| Střední                     | 3     | $0.1 - 1.0$                      |
| Dobrá                       | 2     | $0.01 - 0.1$                     |
| Velmi dobrá                 | 1     | $< 0.01$                         |

Tab. 19 Třídy kvality krycích vrstev betonu [13]



Obr. 63 Wennerova sonda [65]

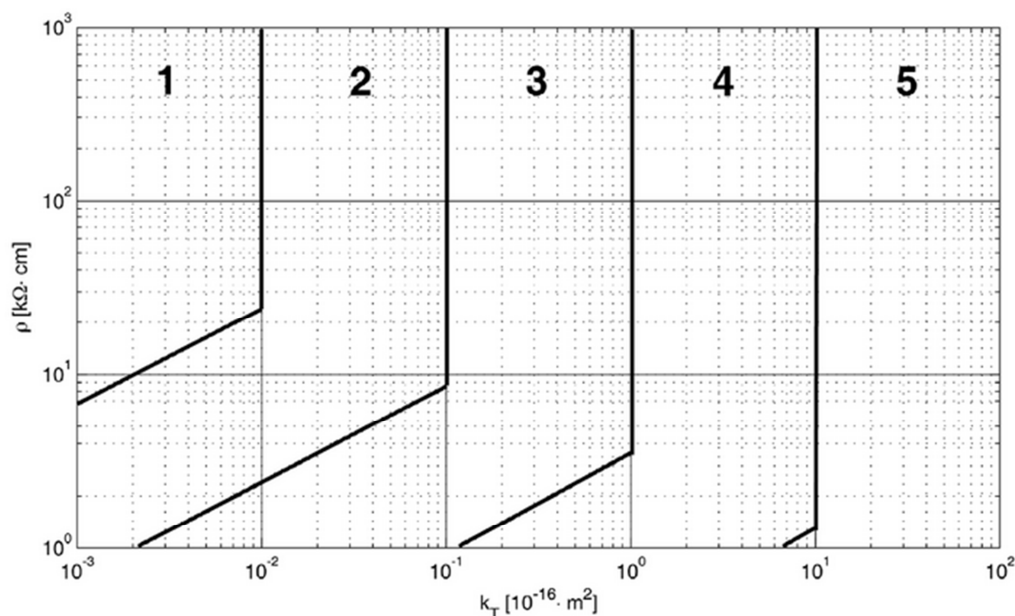
V případě vlhkého betonu je koeficient  $k_T$  kombinací elektrického odporu  $\rho$  měřeného Wennerovou sondou a třídy kvality stanoveného dle nomogramu níže.

U vlhkého betonu je naměřená propustnost nižší, tj. kvalita betonu se zdá být velmi dobrá, ale jedná se pouze o klam a vůbec tomu tak být nemusí. Tento efekt lze korigovat pomocí elektrického odporu  $\rho$  betonu (např. měření Wennerovou sondou). Třída kvality betonu se určuje z  $k_T$  a  $\rho$  v nomogramu.

Rychlost nárůstu tlaku je přímo úměrná vzduchové propustnosti betonu.

Přístroj v sobě obsahuje i kalibraci, která musí být pravidelně prováděna a lze uchovávat výsledky až z 200 měření. Zkouška může být provedena jednou osobou a je vhodná jak pro laboratorní měření, tak i pro in-situ.

Metoda TPT přispívá k hodnocení kvality krycí vrstvy betonu z hlediska trvanlivosti (určí se z tabulky dle výrobce - Tab.19), ale specifikována je pouze švýcarskou normou SN 505 262/1, část E [47].



Obr. 64 Nomogram pro určení kvalitativní kategorie betonu ve vztahu k aktuální vlhkosti [13]

„Standardní operační postup pro přepočet hodnoty součinitele vzduchové propustnosti vzhledem k aktuální vlhkosti“ [43] od autorského kolektivu P. Misák, B. Kucharczyková,

T. Vymazal uvádí, že při hodnotě koeficientu vzduchové propustnosti při referenční 3% hmotnostní vlhkosti  $k_{T,3}$  se určí podle vztahu:

$$k_{T,3} = k_{T,w} \cdot e^{\alpha(3-w)}, \text{ kde} \quad (22)$$

$k_{T,3}$  ...hodnota koeficientu vzduchové propustnosti při referenční 3% vlhkosti,

$k_{T,w}$ ...hodnota koeficientu vzduchové propustnosti při aktuální vlhkosti  $w$ ,

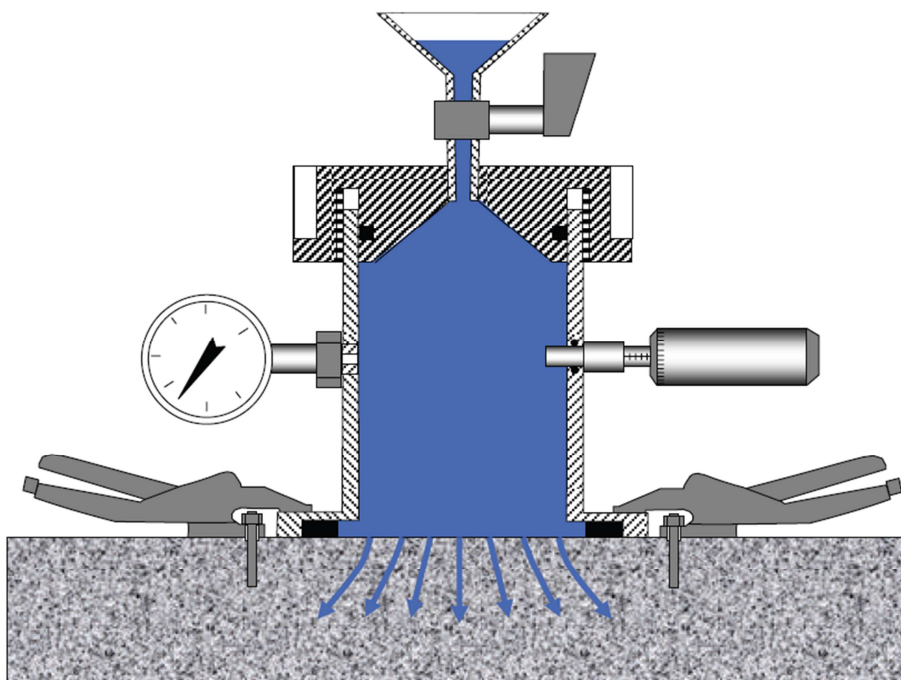
$\alpha$ ...opravný vlhkostní koeficient, jehož hodnota se doporučuje  $\alpha=-0,862$ .

Tento Standardní operační postup [43] bude využit jako vzor pro vytvoření přepočtových vztahů aktuální vlhkosti na srovnávací 3% povrchovou vlhkost i pro metody GWT a ISAT.

### 5.1.2 GWT (Germanns Water Permeability Tester)

Pro stanovení propustnosti povrchových vrstev betonu pro vodu vyrábí firma Germann Instruments přístroj Germanns Water Permeability Tester (dále jen GWT). Během posledních let vyvinula již několik typů zařízení a snaží se je neustále vylepšovat. Přístroj lze zakoupit s rozsahem tlakoměru 0 – 1,5 bar nebo 0 – 6,0 bar, popř. se sací podložkou s vakuovou pumpou, která odstraňuje nutnost vrtání do betonu.

Při zkoušce se postupuje tak, že se do povrchu betonové konstrukce nebo vzorku betonu vyvrtají dva otvory pro upevnění svorek přes ocelové kotvy. Svorkami se upevní tlaková komůrka, naplní se destilovanou vodou a nechá se 5 minut smáčet. Poté se uzavře kohout a pohybem horního hrdla se vytvoří tlak 0,2 bar. Mikrometrický šroub je zasunován do tlakové komůrky, nahrazuje objem vsáknuté vody, a měří množství vody vsáknuté do povrchu betonu. Přístrojem GWT lze měřit vodorovně i svisle.



Obr. 65 Schéma metody GWT - 4000 [20]

Metoda pracuje na principu měření rychlosti průtoku tlakové vody strukturou povrchové vrstvy v čase. Průtok vody procházející vrstvou betonu se vypočítá dle vztahu:

$$Q = \frac{B \cdot (g_1 - g_2)}{A \cdot t} [mm \cdot s^{-1}], \text{ kde} \quad (23)$$

$B$ ...plocha kolíku ( $B=78,6 \text{ mm}^2$  pro 10 mm průměr kolíku),  $g_1, g_2$ ...čtení před a po testu,  $A$ ...smáčený povrch betonu ( $A=3018 \text{ mm}^2$ ),  $t$ ... čas v s.

Z doby průtoku vody danou plochou při tlaku 0,2 bar a objemu zatvrdlého cementového tmele k celkovému objemu betonu se z D'arcyho zákona spočítá součinitel propustnosti betonu  $k_{LD}$  s jednotkou  $mm \cdot s^{-1}$ :

$$k_{LD} = \frac{Q}{b \cdot \frac{p}{L}} [mm \cdot s^{-1}], \text{ kde} \quad (24)$$

$Q$ ...průtok vody [ $mm \cdot s^{-1}$ ],  $b$ ...obsah cementového tmele v rozmezí 0,25 ~ 0,40,  $p$ ...tlak 0,2 bar ( $0,02 \text{ MPa} = 2 \text{ m}$  vodného sloupce),  $L$ ...tloušťka těsnění (15 mm).

Výsledný součinitel vnitřní propustnosti  $k_1$  v  $m^2$  se vypočítá ze vztahu:

$$k_1 = 1,02 \cdot 10^{-7} \cdot k_{LD} [m^2] \quad (25)$$

Takto stanovená hodnota součinitele vnitřní propustnosti krycí vrstvy je v odborné literatuře a řadě evropských standardů považována jako jedno ze základních kritérií pro posouzení trvanlivosti betonu. Výrobce zařízení žádné kritérium pro hodnocení kvality povrchové vrstvy nezveřejňuje, ale dostupné jsou informace v následujících publikacích:

- A) Německá norma DIN 1045 [48] pro betonové konstrukce za trvanlivé betony považovala ty betony, jejichž hodnota vnitřní propustnosti  $k_1$  byla menší než  $1 \cdot 10^{-16} m^2$ . Nyní již norma neplatí, ale v této práci je parametr uváděn, aby bylo možné alespoň podle nějakého kritéria výsledky posoudit.
- B) O metodě se také zmiňují ISO 7031:1988, RILEM CPC 11.2 vydaný mezinárodním výborem a CEN/TC 104/SCI/TG8:184 Standards vydaný evropským výborem.

Tab. 20 Klasifikace kvality betonu pro přístroj GWT dle RILEM TC PSC-230 Draft [13]

| Koeficient vodní propustnosti [ $m^2$ ] | Kvalita betonu |
|-----------------------------------------|----------------|
| $< 10^{-12}$                            | dobrá          |
| $10^{-12}$ až $10^{-10}$                | běžná          |
| $> 10^{-10}$                            | nízká          |

- C) Pro hodnocení míry propustnosti je také uváděna Tab.21, která vychází z řady naměřených dat [13], avšak není normalizovaná.

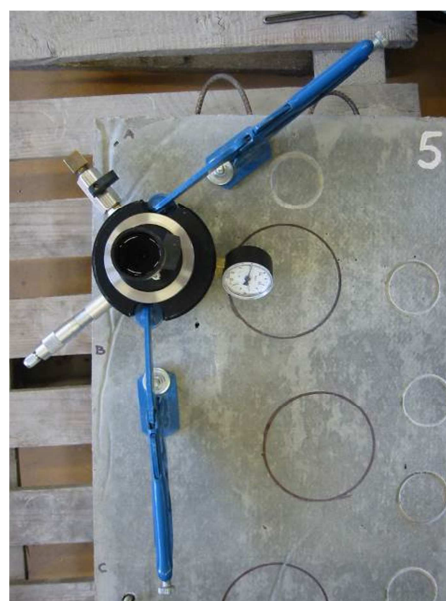


Tab. 21 Standartní klasifikace betonů pro přístroj GWT při tlaku 0,4 bar [13]

| Hodnota propustnosti při tlaku 0,4 bar [mm/s] | Míra propustnosti           |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|
| $0 \sim 1,0 \cdot 10^{-3}$                    | vysoká propustnost betonu   |
| $1,0 \cdot 10^{-3} \sim 1,0 \cdot 10^{-4}$    | průměrná propustnost betonu |
| $1,0 \cdot 10^{-5} \sim 1,0 \cdot 10^{-6}$    | nízká propustnost betonu    |
| $1,0 \cdot 10^{-6} \sim 1,0 \cdot 10^{-7}$    | vysoká nepropustnost betonu |
| $1,0 \cdot 10^{-7} \sim 1,0 \cdot 10^{-9}$    | vyšší nepropustnost betonu  |



Obr. 66 Přístroj GWT – modré svorky pro upevnění přístroje k povrchu, mikrometrický šroub, tlakoměr, napoštěcí (s nálevkou) a vypouštěcí ventil (archiv Kadlecová)



Obr. 67 Pohled na přístroj GWT (archiv Kadlecová)

Měření lze provádět i na krychli 150x150x150 mm, ale je nutná speciální ocelová deska pro fixaci kotev.



Obr. 68 Přístroj GWT na krychli [71]



Obr. 69 Sací podložka s vakuovou pumpou pro GWT [20]

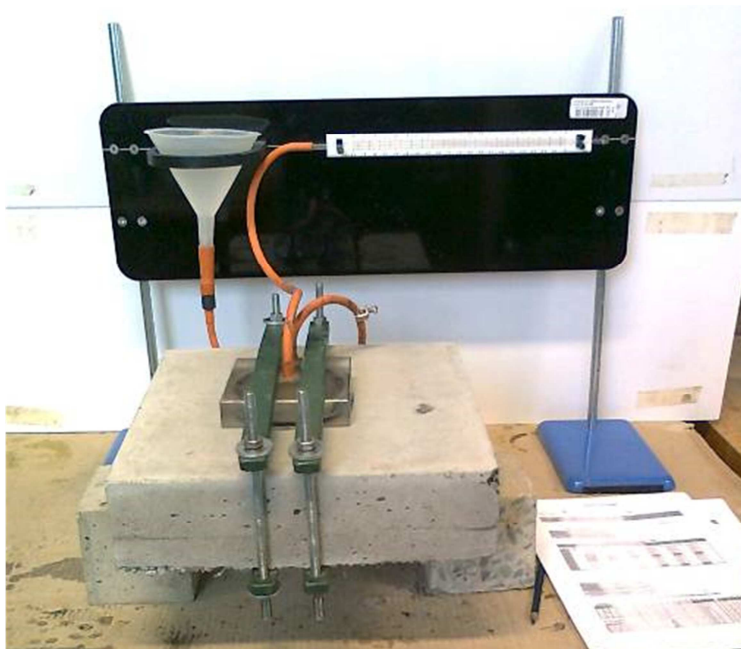


### 5.1.3 ISAT (Initial Surface Absorption Test)

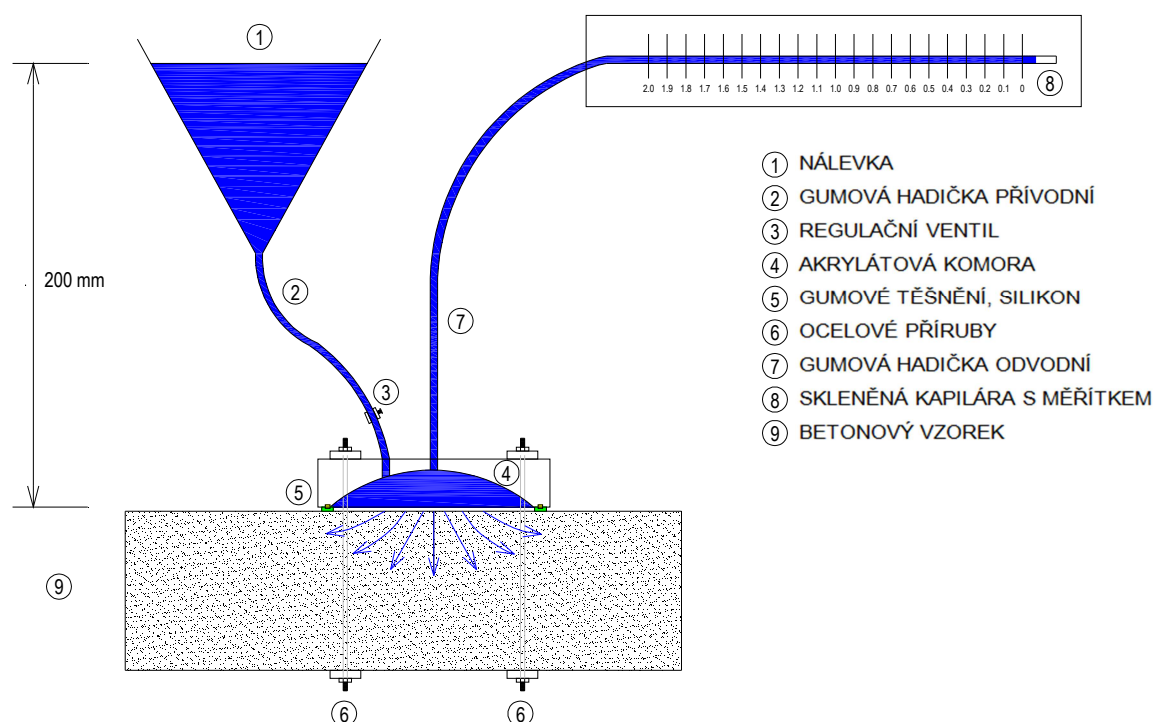
Metoda ISAT byla původně vyvinuta p. Glanvillem (1931) ve Velké Británii a později upravena p. Levitem (1971) jako metoda pro kontrolu jakosti prefabrikovaných dílců. Nyní je využívána pro zjištění stavu struktury betonu a stanovení počáteční povrchové absorpce. Jako jedna z mála metod je ISAT specifikován britskou normou BS 1881- 208:1996 [16] a Operačním postupem [15]. **Jedná se o první metodu vůbec, která byla a stále je využívána pro hodnocení trvanlivosti betonu ve Velké Británii.**

Zkušební zařízení ISAT se skládá z:

- akrylátové komory s kontaktní vodní plochou na betonu alespoň 5000 mm<sup>2</sup>,
- pryžového těsnění se silikonem pro zajištění vodotěsnosti na styku akrylátové komory a betonu,
- ocelových přírub pro připevnění akrylátové komory na povrch betonu,
- skleněné kapilární trubice se stupnicí, jejíž délka je min. 200 mm a průměr od 0,1 do 0,4 mm. Kapilára je umístěna 200 mm nad úroveň povrchu betonu, což zajišťuje tlak 0,02 bar,
- nálevky pro nalévání vody do akrylátové komory a je spojena s přívodní hadičkou,
- přívodní gumové hadičky, která spojuje nálevku s akrylátovou komorou a je opatřena ventilem pro regulaci přívodu vody z nálevky,
- odvodní gumové hadičky, která spojuje akrylátovou komoru se skleněnou kapilárou.



Obr. 70 Přístroj ISAT (na černém podkladu jsou ukotveny průhledná nálevka a kapilára se stupnicí, akrylátová komora je připevněná na betonovém povrchu zelenými svorkami a vše je propojeno oranžovými přívodními a odvodními hadičkami (archiv Kadlecová)



Obr. 71 Schéma zařízení ISAT

Metoda spočívá v měření množství tlakové vody vnikající do zkoušeného vzorku přes danou zkušební plochu. Tato plocha je definována plochou akrylátové komory, jež je nepropustně upevněna k povrchu betonu ocelovými přírubami. Množství absorbované vody se získá měřením doby pohybu vody kapilárním systémem známého objemu. Průhledná komora je spojena s přívodním otvorem s nálevkou a odvodní otvor komůrky je spojen se skleněnou kapilárou s měřítkem. Spojení je zajištěno gumovými hadičkami. Před vstupem do komůrky je hadička opatřena ventilem pro regulaci přívodu vody z nálevky. Aby byl vytvořen tlak 0,02 bar, je kapilára s měřítkem i nálevka s vodou umístěna 200 mm nad komorou. Po naplnění komůrky je přívod vody z nádržky uzavřen a probíhá měření pohybu vody. Počet jednotek na měřítku po prvních 5 sekundách měření určuje předběžnou třídu kvality povrchu betonu a také periodu, po které se v průběhu měření budou odečítat data – 30 s, 1 min. nebo 2 min. Čtení souboru dat je prováděno po 10, 30, 60 a 120 minutách od momentu prvního smočení povrchu. Schéma přístroje ISAT je na obrázku Obr. 71.

Průtok vody plochou (rychlost počáteční absorpce) je definován rovnicí [14]:

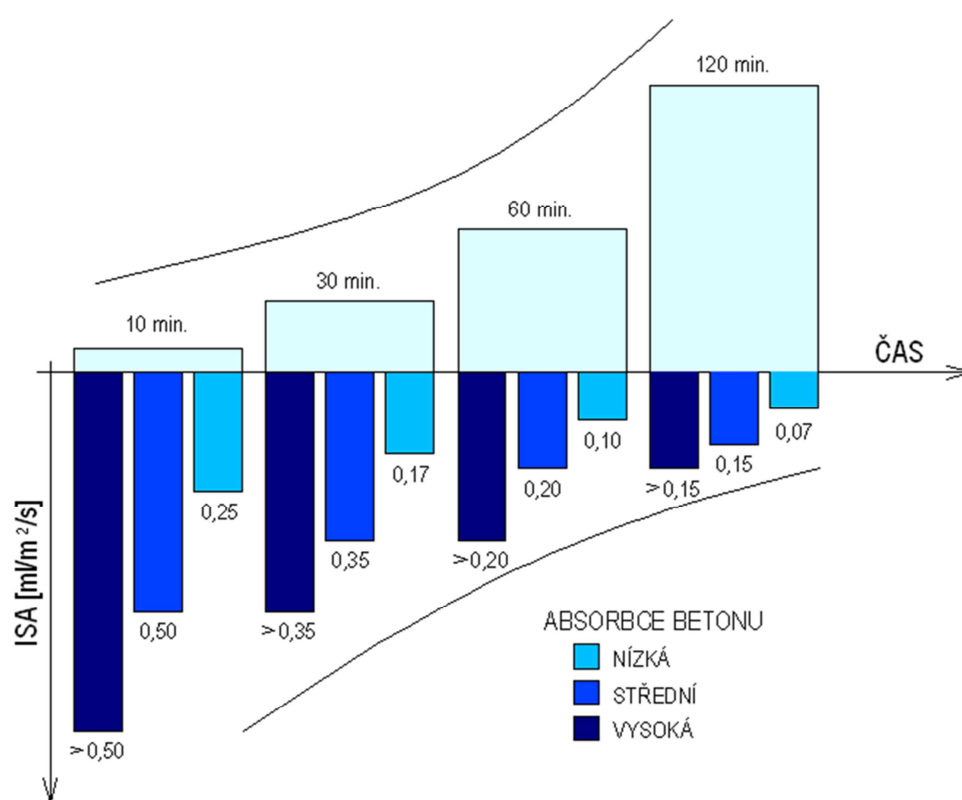
$$ISA = \frac{0,6 \cdot D}{t} \left[ \text{ml} / \text{m}^2 / \text{s} \right], \text{ kde} \quad (26)$$

D... počet dílků, t...čas [s].

Tab. 22 Klasifikace povrchové vrstvy betonu metodou ISAT [2]

| Absorpce betonu | Výsledky zkoušky ISAT [ $\text{ml/m}^2/\text{s}$ ] |                  |                  |                  |
|-----------------|----------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                 | Čas od začátku testu                               |                  |                  |                  |
|                 | 10 min.                                            | 30 min.          | 60 min.          | 120 min.         |
| Vysoká          | $> 0,50$                                           | $> 0,35$         | $> 0,20$         | $> 0,15$         |
| Střední         | $0,25 \sim 0,50$                                   | $0,17 \sim 0,35$ | $0,10 \sim 0,20$ | $0,07 \sim 0,15$ |
| Nízká           | $< 0,25$                                           | $< 0,17$         | $< 0,10$         | $< 0,07$         |

Výše uvedená tabulka lze graficky znázornit následovně:



Obr. 72 Grafické znázornění hodnocení výsledků metodou ISAT [VZ]

Metoda ISAT má také svá omezení:

- Pouze pro laboratorní zkoušení.
- Zkoušena je pouze povrchová vrstva betonu v tloušťce 10 – 15 mm; s ohledem na korozi betonářské výztuže je třeba stanovit kvalitu celé krycí vrstvy oceli. Nicméně i tato hloubka může být dostatečná k rozlišení materiálů a stavu vytvrzení betonu.
- Výsledky měření mohou být významným způsobem ovlivněny povrchovým povlakem včetně bleedingu (povrchový povlak vody), dle způsobu ošetřování. Povrchová karbonatace na vyztuženém povrchu způsobuje prokazatelně nižší výsledky.

d) Ze zkoušeného betonu jsou destruktivně vyjmuty vývrty o min. průměru 150 mm za účelem získání shodných výsledků měření nebo je měření prováděno na dlaždicích, krychlích nebo hranolech.

e) Tato metoda je zcela nedestruktivní, ale pro upevnění komory na povrchu betonu jsou nutné příruby. Metodu nelze aplikovat na spodní straně desky a nosníky, s výjimkou velmi malých rozměrů k okrajům nosníku.

f) Vliv stavu vlhkosti betonu na měřené vlastnosti a nízký vodní sloupec.

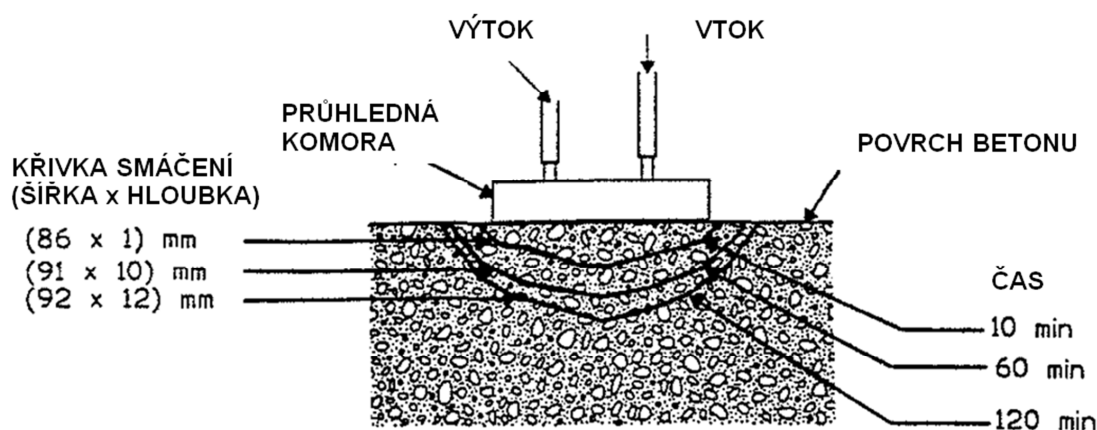
Metoda byla srovnávána řadou testů a porovnání, nejvýznamnější výsledky uvádí následující tabulka.

Tab. 23 Obecný vztah mezi propustností a absorpcí - výsledky na suchém betonovém povrchu (VZ [2])

| Metoda                            |                        | Propustnost / absorpce betonu |                          |              |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------|
|                                   |                        | nízká                         | střední                  | vysoká       |
| Vnitřní propustnost $k$           | [m <sup>2</sup> ]      | $< 10^{-19}$                  | $10^{-19} \sim 10^{-17}$ | $> 10^{-17}$ |
| ISAT – 10 min                     | [ml/m <sup>2</sup> /s] | $< 0,25$                      | $0,25 \sim 0,50$         | $> 0,50$     |
| Figg test (voda)                  | [s]                    | $> 200$                       | $100 \sim 200$           | $< 100$      |
| Modifikovaný Figgův test (vzduch) | [s]                    | $> 300$                       | $100 \sim 300$           | $< 100$      |
| BS vodní absorpce 30 min          | [%]                    | $< 3$                         | $3 \sim 5$               | $> 5$        |
| DIN 1048 – 4 dny                  | [mm]                   | $< 30$                        | $30 \sim 60$             | $> 60$       |

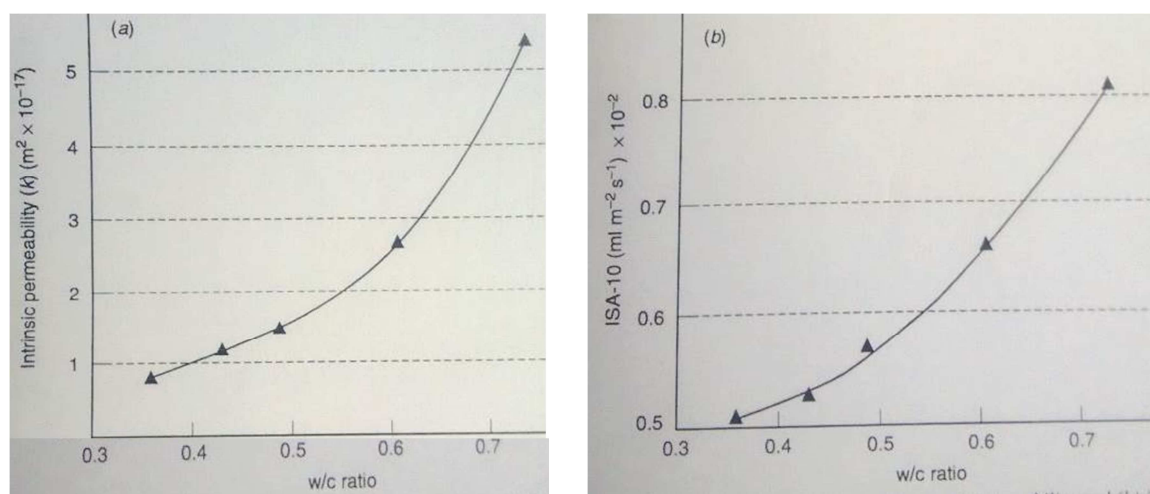
Poznámka: Přibližné hodnoty koeficientu propustnosti pro vodu o teplotě 20 °C je  $K_w = 9,75 \cdot 10^{-5} \text{ k m/s}$ , pro vzduch o teplotě 20 °C je vnitřní propustnost  $K_g = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ k m/s}$ .

Zajímavý je také následující obrázek, na němž jsou zakresleny křivky smáčení, které vystihují hloubku absorbované vody v závislosti na čase.

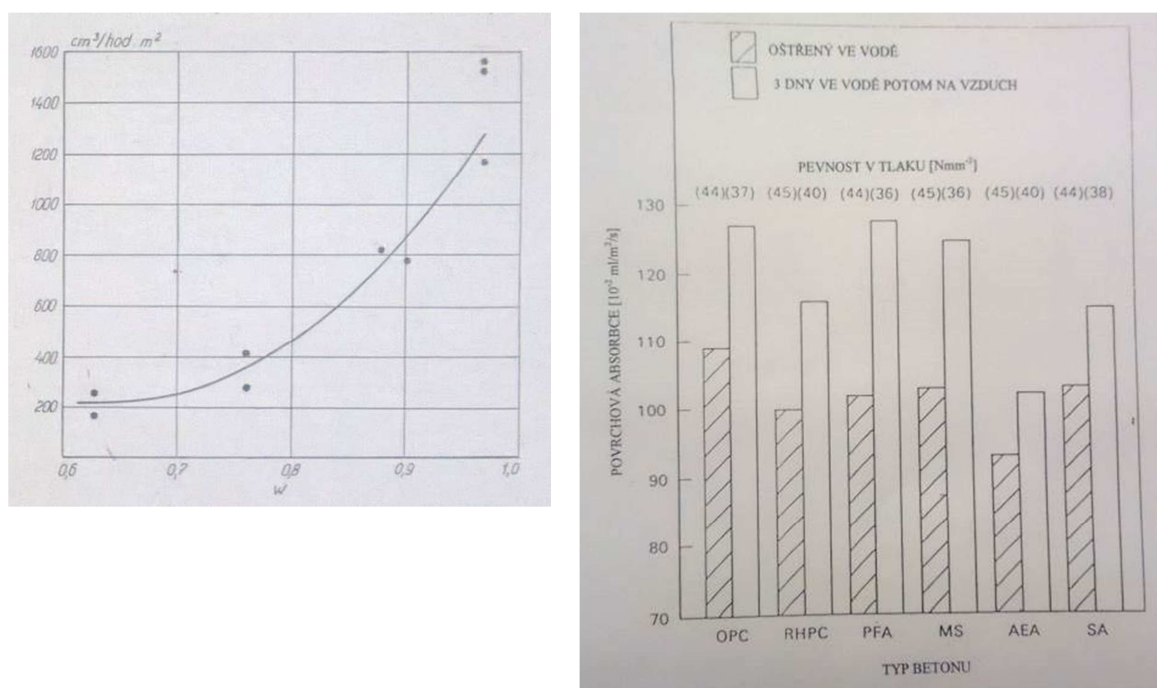


Obr. 73 Typické křivky smáčení vodou o teplotě 35 °C po provedení metody ISAT [61]

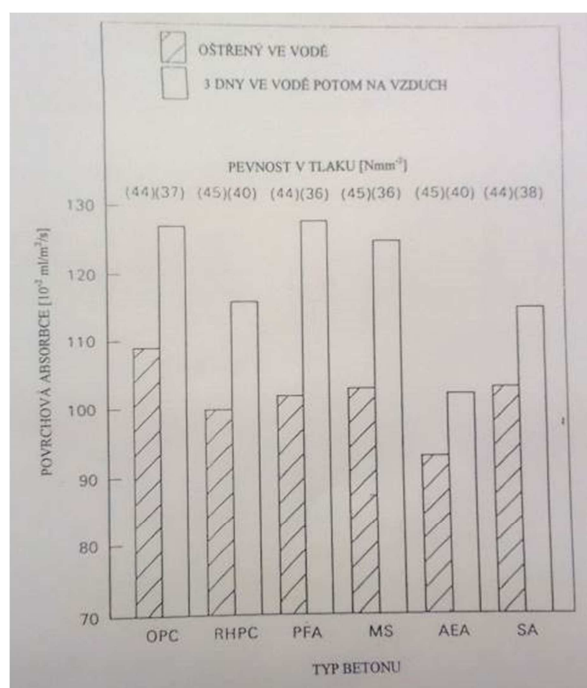
Na dalších obrázcích jsou uvedeny zajímavé závěry z různých měření, zejména závislosti hodnoty  $ISA$  na  $w/c$  (Obr. 75 a 76) a typu betonu (Obr. 77).



Obr. 74 Závislost  $w/c$  na a) vnitřní propustnosti, b) hodnotě  $ISA$  v čase 10 min [40]



Obr. 75 Vliv vodního součinitele na propustnost betonu při objemové absorpci betonu [25]  
hmotnosti  $3000 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ , stáří 9 měsíců a tlaku vody 3 atm. [75]

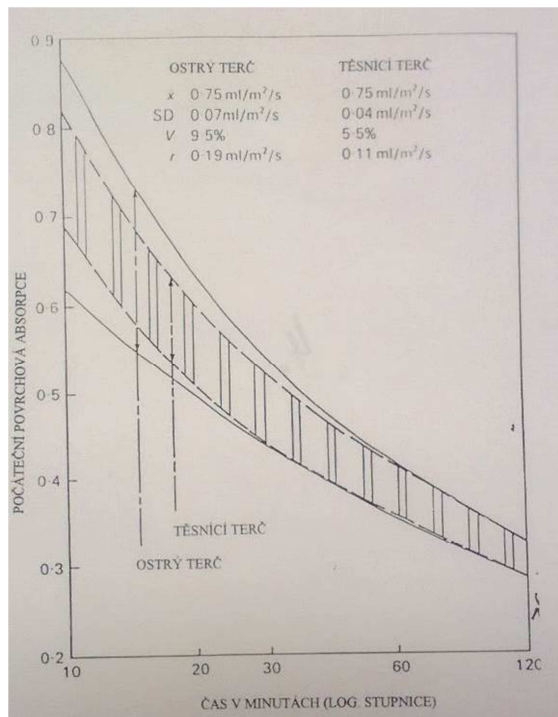


Obr. 76 Vliv typu betonu na povrchové absorpci betonu [25]

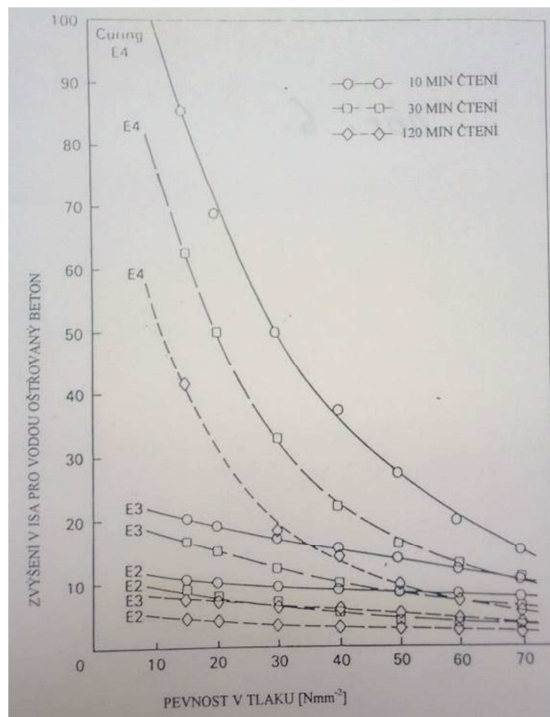
Následující Obr. 77 uvádí, jaký je rozdíl v použití metody ISAT s těsněním (těsnící terč) a bez těsnění (ostrý terč). Při srovnání počáteční povrchové absorpce po 10 minutách ( $ISA_{10 \text{ min}}$ ) je variační koeficient při použití těsnění 5,5 % a bez těsnění 9,5 %. Je zde také patrný pokles hodnoty  $ISA$  s časem, neboť voda proniká do pórové struktury betonu, plní je a kapilární sání se s časem snižuje. Z tohoto důvodu je vždy nutné uvádět, v jakém čase byla

hodnota  $ISA$  naměřena. Hodnota  $ISA$  je výrazně ovlivněna vlhkostí, proto je před testem nutné nechat zkušební povrch vysušit po dobu 7 až 14 dní před zkouškou.

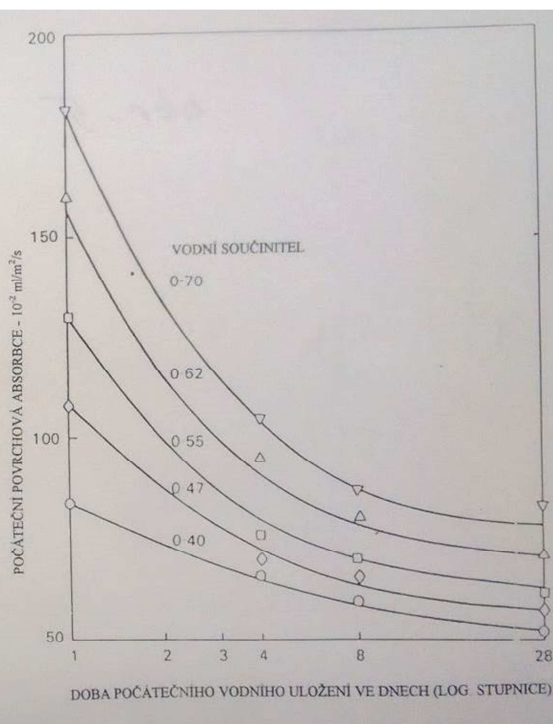
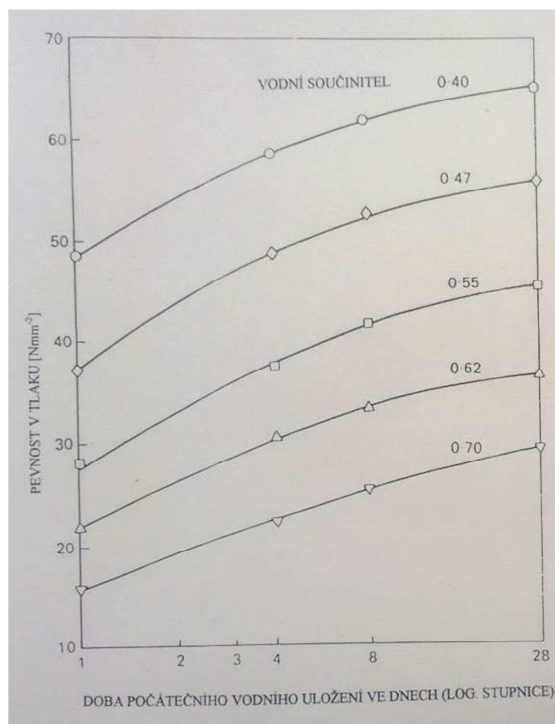
Obr. 78 a 79 uvádí závislosti hodnoty  $ISA$  na způsobu uložení a pevnosti v tlaku, kdy se snižujícím se vodním součinitelem se pevnost v tlaku zvyšuje.



Obr. 77 Vliv času na počáteční povrchové absorpci [25]



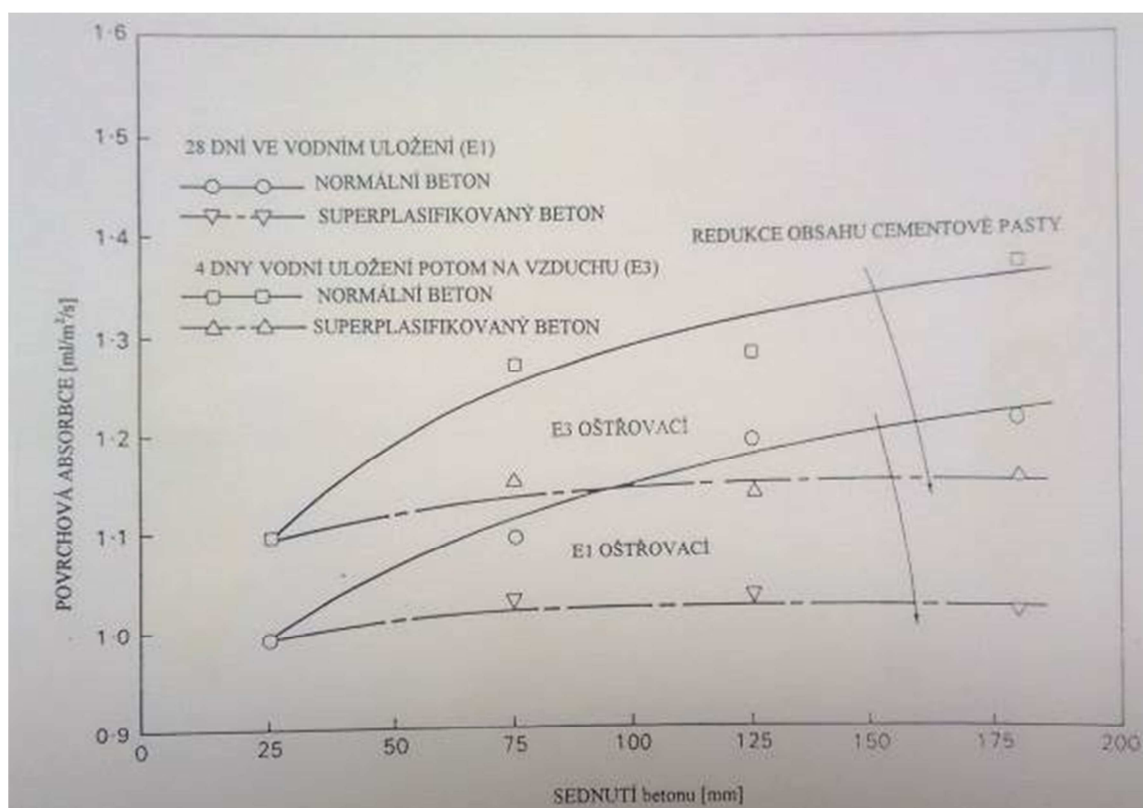
Obr. 78 Vliv pevnosti v tlaku na hodnotě  $ISA$  [25]



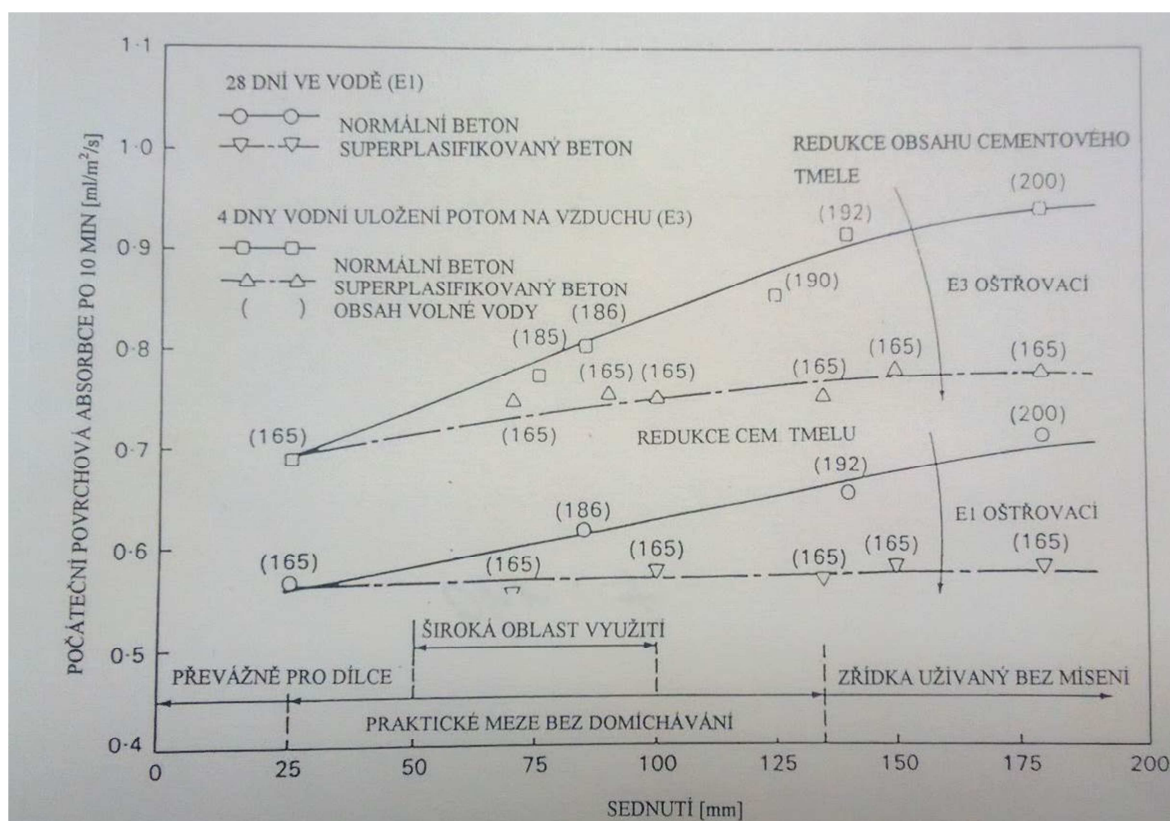
Obr. 79 Vliv počátečního vlhkého uložení na pevnosti v tlaku a počáteční povrchové absorpci [25]



Obr. 80 až Obr. 83 porovnávají vliv uložení (vodní, v sušárně) na výsledné počáteční povrchové absorpci. Je zde zohledněno sednutí kužele i typ betonu.

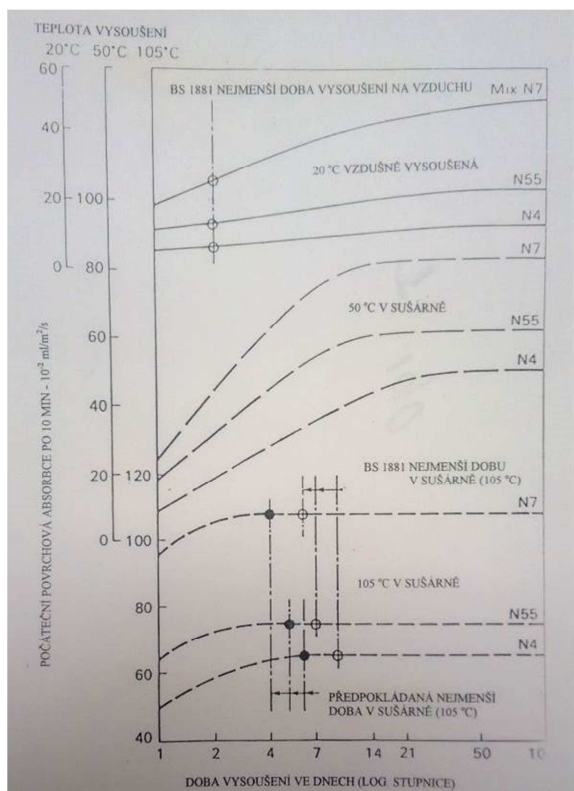


Obr. 80 Vliv sednutí kužele na povrchové absorpci betonu při  $w = 0,55$  [25]

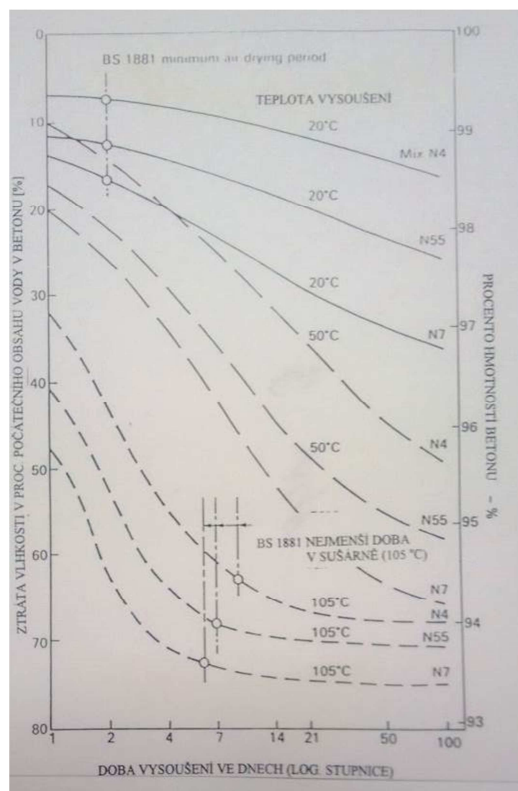


Obr. 81 Vliv sednutí kužele na počáteční povrchové absorpci [25]





Obr. 82 Vliv doby vysušování na povrchové absorpci [25]



Obr. 83 Vliv doby vysušování na ztrátu vlhkosti [25]

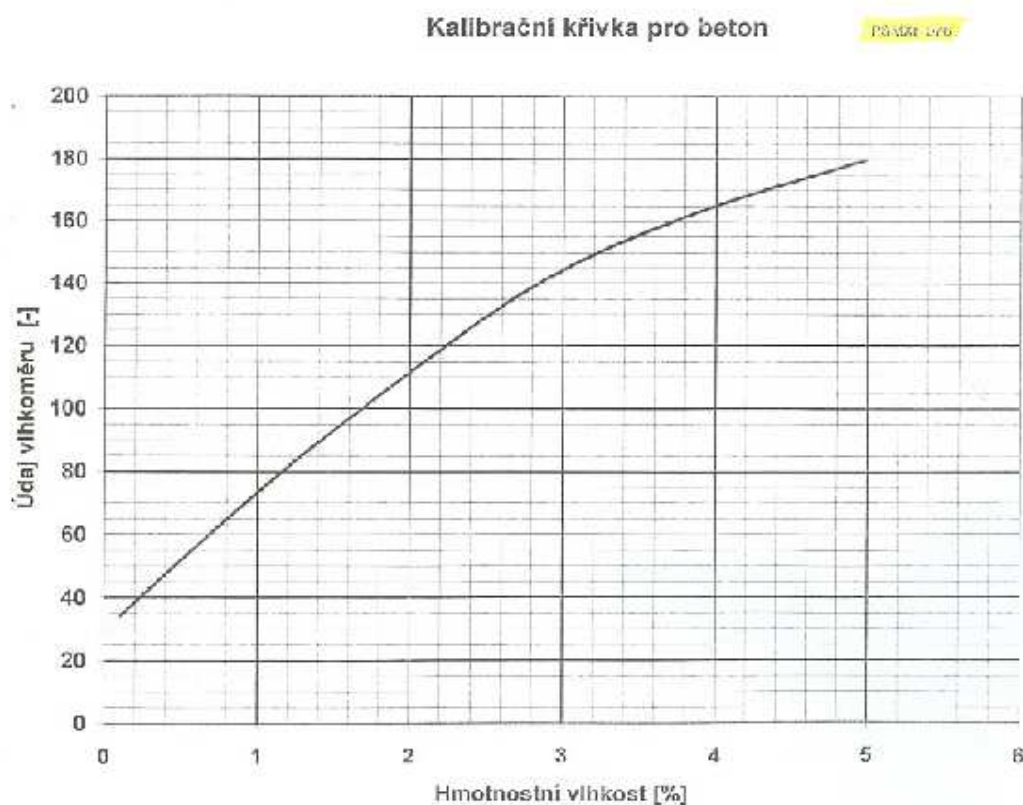
### 5.1.4 KAKASO (PSMXi)

Rozložení vlhkosti v povrchové vrstvě betonu je velmi významnou vlastností, proto byla tato zkouška provedena na každém zkušebním tělese. Pro měření byl použit digitální kapacitní vlhkoměr (Obr. 84).

Jedná se o příložnou sondu PSMXi, která po přiložení k povrchu betonu a stisknutí tlačítka zobrazí na displeji bezrozměrnou hodnotu. Pomocí kalibrační křivky (Obr. 85) se stanoví hodnota povrchové hmotností vlhkosti. Kalibrační křivka je odlišná pro různé materiály.



Obr. 84 Kapacitní vlhkoměr Kakaso (PSMXi)



Kalibraci provedl  
8.10.2006  
Doc. Ing. Petr Semerák, Ph.D.

FAKULTA STAV.  
Katedra  
Ing. Petr Semerák  
102 35 Praha 6, ČR  
tel. 224 123 456  
fax 224 123 457

Obr. 85 Kalibrační křivka pro beton [44]

## 5.2 ETAPA 2 – NÁVRH VELIČIN PRO EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ

V rámci druhé etapy byly stanoveny veličiny, které je možné na přístrojích TPT, GWT, KAKASO a metodou ISAT naměřit nebo následným vyhodnocením vypočítat. Jejich přehled je uvedený v následující tabulce.

Tab. 24 Přehled hlavních veličin pro experimentální sledování

| OZN.            | VELIČINA                            | METODA         | Jednotka               |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|------------------------|
| $k_T$           | součinitel vzduchové propustnosti   | TPT            | [m <sup>2</sup> ]      |
| $k_1$           | součinitel vnitřní propustnosti     | GWT            | [m <sup>2</sup> ]      |
| $ISA_{10\ min}$ | průtok vody po 10 min. absorpce     | ISAT           | [ml/m <sup>2</sup> /s] |
| $ISA_{30\ min}$ | průtok vody po 30 min. absorpce     | ISAT           | [ml/m <sup>2</sup> /s] |
| $w$             | odhad povrchové hmotnostní vlhkosti | KAKASO (PSMXi) | [%]                    |

Veličiny  $ISA_{60\ min}$  a  $ISA_{120\ min}$  nebyly z důvodu velké časové náročnosti stanovovány. Výsledky dříve prováděných zkoušek prokázaly, že tuto hodnotu lze analogicky odvodit. Z důvodu časové efektivnosti používání přístroje byly měřeny hodnoty  $ISA_{60\ min}$  pouze u GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech.

Díličí hodnoty ani ostatní parametry, které byly v rámci výzkumu naměřeny a získány, nejsou uvedeny v této práci. S ohledem na velké množství naměřených dat byly vybrány jen ty nejzajímavější. Jsou zde uvedeny pouze strohé výsledky po vyhodnocení bez konkrétně naměřených hodnot.

Výše uvedené veličiny byly stanovovány při experimentálních měřeních v rámci konkrétních grantových projektů, podle kterých jsou také získané poznatky řazeny:

- 1) Spolupráce s OHL ŽS, a.s.,
- 2) GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech,
- 3) FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny,
- 4) FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti,
- 5) FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu.

### **5.3 ETAPA 3 – NÁVRH A MNOŽSTVÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES, RECEPTURY, ULOŽENÍ**

V prvotních fázích mého výzkumu bylo ve spolupráci se společností OHL ŽS, a.s. a Kloknerovým ústavem ČVUT Praha provedeno rozsáhlé měření, které jasně stanovilo další strategii experimentálního měření. Kloknerův ústav ČVUT Praha požadoval měření na betonových kvádrech o velikosti 700x400x150 mm, které se pro vysokou hmotnost a těžkopádnou manipulaci příliš neosvědčily. Také měření povrchové počáteční absorpce metodou ISAT bylo na takto rozměrných kvádrech výrazně omezeno na rohové části. Pro společnost OHL ŽS, a.s. byly vyrobeny betonové trámce 400x100x100 mm a následně i dlaždice o rozměrech 300x300x80 mm, které poskytovaly dostatečně velikou zkušební plochu a pro zkoušení vzduchové propustnosti metodou TPT se velmi osvědčily. Betonové dlaždice proto byly vybrány jako nejvhodnější zkušební tělesa. Jako doplňková tělesa byly zvoleny standardně používané krychle o hraně 150 mm.

Zkušební tělesa zrála po dobu od 2 dnů až po 2,5 roky.

Další informace jsou uvedeny u konkrétních experimentálních měření v rámci dílčích projektů.

#### **5.3.1 Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.**

##### **5.3.1.1 Zkušební tělesa a jejich množství**

Pro zkoušky vzduchové propustnosti a absorpce vody byly vyrobeny 4 hranoly o rozměrech 100x100x400 mm a 18 dlaždic o rozměrech 300x300x80 mm.

##### **5.3.1.2 Receptura čerstvého betonu**

Přesná receptura těchto betonů není známa, neboť se jednalo o betony odebrané in situ, při betonáži mostovkové desky druhého pole mostu Hradecká. Dle pokynů zadavatele víme, že se jednalo o betony provzdušněné třídy C35/45 XF4 označené „O“ s 2 % nebo „P“ s 10 % obsahem vzduchu ze dne 29. 10. 2009 a 30. 10. 2009 a o betony neprovzdušněné ze dne 30. 5. 2009.

##### **5.3.1.3 Způsob a doba uložení zkušebních těles**

Zkušební tělesa byla uložena v normálním laboratorním prostředí. Betonové hranoly byly zkoušeny ve stáří 21, 28, 36 a 54 dnů. Dlaždice byly zkoušeny po 5 až 6 týdnech a dále byly podrobeny dlouhodobým zkouškám po 6 měsících (měřila Ing. Barbora Kucharczyková, PhD.) a po 2,5 rocích.

### 5.3.2 Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech

#### 5.3.2.1 Zkušební tělesa a jejich množství

Pro různé doby hydratace (2, 3, 7, 14, 28 a 90 dní) byly vyrobeny 3 ks dlaždic o rozměrech 300x300x80 mm a 3 ks krychlí o rozměrech 150x150x150 mm.

#### 5.3.2.2 Receptura čerstvého betonu

Pro experimentální měření byla použita referenční receptura, jejíž složení je zřejmé z následující tabulky (Tab. 25). Jedná se o standartní recepturu používanou společností BETOTECH.

Byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá, písek frakce 0-4 mm z Bratčic a hrubá drť frakce 8-16 mm z Olbramovic. Množství vody bylo dávkováno tak, aby výsledné sednutí kužele dosahovalo hodnoty S2 dle ČSN EN 206-1. Betonová směs neobsahovala žádné přísady ani příměsi. Objemová hmotnost čerstvého betonu byla 2 320 kg.m<sup>-3</sup>.

Tab. 25 Receptura čerstvé betonové směsi – referenční beton

| CEM I 42,5 R<br>Mokrá | Kamenivo           |                        | Voda | Teoretická<br>objemová hmotnost<br>čerstvého betonu |
|-----------------------|--------------------|------------------------|------|-----------------------------------------------------|
|                       | 0-4 mm<br>Bratčice | 8-16 mm<br>Olbramovice |      |                                                     |
| [kg]                  | [kg]               | [kg]                   | [kg] | [kg.m <sup>-3</sup> ]                               |
| 430                   | 860                | 910                    | 185  | 2 385                                               |

#### 5.3.2.3 Způsob a doba uložení zkušebních těles

Vlastnosti betonu byly ověřovány po 2, 3, 7, 14, 28 a 90 dnech od uložení betonu do forem. Zkušební vzorky byly po jednom dni tuhnutí a tvrdnutí ve formách přikrytých PE fólií odformovány a dále zrály předem stanovenou dobu ve vodní lázni. Například zkušební tělesa, jejichž vlastnosti byly ověřovány po 7 dnech (označení 7D), byla umístěna 1 den ve formě při relativní vlhkosti vyšší než 95 %, poté 5 dnů ve vodní lázni a posléze byla 24 hodin sušena při teplotě 105 °C. Před samotným zkoušením byla tělesa temperována 2 hodiny ve standardních laboratorních podmínkách. Doba umístění zkušebních vzorků ve formách (1 den) a v sušičce (1 den) byla pro všechny sady těles stejná. Lišila se pouze doba uložení ve vodní lázni (vzorky označené 2D nebyly uloženy ve vodní lázni vůbec). Předpokladem bylo, že omezená doba pro tvorbu hydratačních produktů se projeví na vývoji pórové struktury ve vzorku a tím i na vlastnostech betonu. Současně se předpokládalo, že se v horkém prostředí bez vlhkosti hydratační proces prakticky zastaví a doposud vytvořená pórová struktura se již zásadně nebude měnit.

### 5.3.3 Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny

#### 5.3.3.1 Zkušební tělesa a jejich množství

Pro zkoumání vlastností povrchové vrstvy vláknobetonu byly vyrobeny betonové dlaždice o rozměrech 300x300x80 mm s objemovou hmotností  $2\,350\text{ kg.m}^{-3}$ . Patnáct vzorků bylo vyrobeno ve dvou sadách po šesti kusech a v jedné sadě po třech kusech.

Dále bylo vyrobeno 54 krychlí o rozměru 150x150x150 mm ve třech sadách. Každá sada měla různý vodní součinitel ( $v/c=0,65$ ;  $v/c=0,55$ ;  $v/c=0,45$ ) a v každé sadě byly 3 typy záměsí (referenční bez vláken, s vlákny Stavon a s vlákny Econo-Net).

#### 5.3.3.2 Receptura čerstvého betonu

Receptura vláknobetonu pro zkoušky na dlaždicích (Tab. 26) byla odvozena z receptury pro obyčejný beton (viz GAČR č. 103/09/0065). Při výrobě vláknobetonu byly použity tyto vlákna (Obr. 86 až 88):

- Stavon – polypropylenová monofilamentní mikroválka, délka vláken 12 mm, množství v  $1\text{ m}^3$  cca 450 miliónů kusů.
- Econo-Net – polypropylenová vlákna vyráběná ve fibrilované formě, délka 38 mm.
- Anti-crak - vysokopevnostní (3500 MPa) a vysokomodulová (73 GPa) mikroválka vyrobená ze speciální alkalivzdorné skloviny s vysokým obsahem oxidu zirkoničitého, průměr vláken je 14  $\mu\text{m}$ , délka 12 mm, množství v 1 kg cca 200 miliónů kusů.

Tab. 26 Receptura čerstvé betonové směsi pro měření na dlaždicích

| Složení čerstvé betonové směsi na 1 m <sup>3</sup> |                    |                        |        |                       | Sednutí<br>kužele po<br>přídavku<br>vody |
|----------------------------------------------------|--------------------|------------------------|--------|-----------------------|------------------------------------------|
| CEM I 42,5 R<br>Mokrá                              | Kamenivo           |                        | Voda * | Vlákna<br>Anti-crak   |                                          |
|                                                    | 0-4 mm<br>Bratčice | 8-16 mm<br>Olbramovice |        |                       |                                          |
| [kg]                                               | [kg]               | [kg]                   | [kg]   | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [mm]                                     |
| 430                                                | 860                | 910                    | 185    | 0,6                   | 115 -135                                 |



Obr. 86 Vlákna Stavon délky 12 mm



Obr. 87 Vlákna Econo-Net délky 38 mm



Obr. 88 Vlákna Anti-crak délky 12 mm [74]

Receptury referenčních vláknobetonů pro zkoušky na krychlich jsou patrné z následující tabulky.

Tab. 27 Receptura čerstvé betonové směsi pro měření na krychlich

| Složení čerstvé betonové směsi na 1 m <sup>3</sup> |                    |                       |                           |      |      |
|----------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|------|------|
| CEM I 42,5 R<br>Mokrý                              | Kamenivo           |                       |                           | Voda | v/c  |
|                                                    | 0-4 mm<br>Bratčice | HK 4-8 mm<br>Želešice | HK 8-16 mm<br>Olbramovice |      |      |
| [kg]                                               | [kg]               | [kg]                  | [kg]                      | [l]  | -    |
| 349                                                | 760                | 380                   | 760                       | 157  | 0,45 |
| 349                                                | 724                | 362                   | 724                       | 192  | 0,55 |
| 349                                                | 686                | 343                   | 686                       | 227  | 0,65 |

Do těchto referenčních směsí byly dávkovány vlákna Econo-Net délky 38 mm a Stavon délky 12 mm v množství doporučeném výrobcem, což je 600 g na 1 m<sup>3</sup> čerstvého betonu.



### 5.3.3.3 Způsob a doba uložení zkušebních těles

Zkušební betonové dlaždice byly uloženy ve vlhkém prostředí (95 %) po dobu 27 dní a jeden den ponechány v laboratorních podmínkách. První sada betonových dlaždic (č. 1 až 6) byla zkoušena ihned, druhá sada (č. 7 až 12) byla umístěna na 48 h do sušárny při 50 °C, ochlazena v průjezdu s přirozeným pohybem vzduchu a následně zkoušena. Třetí sada (č. 13 až 15) byla sušena stejně jako sada druhá, ale ochlazování probíhalo 24 hodin.

Betonové krychle byly po odformování umístěny v laboratoři a překryty neprodyšnou fólií. Takto uložené zůstaly po dobu 14 dní, poté byla fólie odstraněna a tělesa zůstaly volně v laboratoři s teplotou  $21 \pm 2$  °C a relativní vlhkostí  $41 \pm 3$  %.

### 5.3.4 Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti

#### 5.3.4.1 Zkušební tělesa a jejich množství

Pro dlouhodobé zkoušky s dobou uložení vzorků 2 roky bylo vyrobeno cca 35 ks betonových dlaždic o rozměrech 300x300x80 mm, na kterých bylo stanoveno 110 měřících míst.

#### 5.3.4.2 Receptura čerstvého betonu

Receptura byla totožná s recepturou používanou v FAST-J-10-96 a je patrná z následující tabulky.

Tab. 28 Receptura čerstvé betonové směsi – vláknobeton

| Složení čerstvé betonové směsi na 1 m <sup>3</sup> |                    |                        |      |                       | Sednutí<br>kužele po<br>přídavku<br>vody |
|----------------------------------------------------|--------------------|------------------------|------|-----------------------|------------------------------------------|
| CEM I 42,5 R<br>Mokrá                              | Kamenivo           |                        | Voda | Vlákna<br>Anti-crak   |                                          |
|                                                    | 0-4 mm<br>Bratčice | 8-16 mm<br>Olbramovice |      |                       |                                          |
| [kg]                                               | [kg]               | [kg]                   | [kg] | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [mm]                                     |
| 430                                                | 860                | 910                    | 185  | 0,6                   | 115 -135                                 |

#### 5.3.4.3 Způsob a doba uložení zkušebních těles

Zkušební tělesa byla uložena ve vlhkém prostředí (95 %) po dobu 28 dní a poté ponechána v laboratorních podmínkách s teplotou  $21 \pm 2$  °C a relativní vlhkostí  $41 \pm 3$  % až do doby zkoušení.

### 5.3.5 Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu

#### 5.3.5.1 Zkušební tělesa a jejich množství

Pro stanovení vztahu mezi jednotlivými trvanlivostními charakteristikami byly vyrobeny zkušební dlaždice o rozměrech 300x300x80 mm s celkovým množstvím 50 ks.

#### 5.3.5.2 Receptura čerstvého betonu

Receptura pro výrobu zkušebních těles byla totožná jako při měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech a je uvedena v následující tabulce.

Tab. 29 Receptura čerstvé betonové směsi – referenční beton

| CEM I 42,5 R<br>Mokrá | Kamenivo           |                        | Voda | Teoretická objemová<br>hmotnost čerstvého betonu |
|-----------------------|--------------------|------------------------|------|--------------------------------------------------|
|                       | 0-4 mm<br>Bratčice | 8-16 mm<br>Olbramovice |      |                                                  |
| [kg]                  | [kg]               | [kg]                   | [kg] | [kg.m <sup>-3</sup> ]                            |
| 430                   | 860                | 910                    | 185  | 2 385                                            |

#### 5.3.5.3 Způsob a doba uložení zkušebních těles

Zkušební tělesa byla uložena ve vlhkém prostředí (95 %) po dobu 25 dní a poté ponechána v laboratorních podmínkách s teplotou  $21 \pm 2$  °C a relativní vlhkostí  $41 \pm 3$  %. Poté byla prováděna měření ve stáří 28 dní a 1 rok.

## 5.4 ETAPA 4 – VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES A ZPŮSOB ZRÁNÍ

Ve čtvrté etapě byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušky permeability. Vzorky byly vyráběny v laboratořích ÚSZK FAST VUT nebo přímo na staveništi (spolupráce s OHL ŽS, a.s.).

Výrobě zkušebních vzorků byla věnována velká pozornost. Při samotné výrobě se dbalo zejména na dokonalé zhutnění vzorků a uhlazení povrchové vrstvy. Obsahuje-li povrchová vrstva cementového mléka velké množství vzduchových pórů, které se usadí na povrchu, není tento vzorek vhodný pro měření a je nutné povrch zabrousit. Vzduchové póry významným způsobem ovlivňují výsledky měření, stejně tak jako nerovnosti, trhliny, mikrotrhliny a jiné defekty, proto nelze provádět měření na všech zkušebních místech, ale pouze na těch vhodných.

Zkušební tělesa zrály těmito způsoby:

- ve vlhkém prostředí při vlhkosti 95 % a teplotě  $21 \pm 2$  °C,

- nebo ve vodním uložení,
- popř. zrání v laboratorních podmínkách s teplotou  $21\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a relativní vlhkostí  $41\% \pm 3\%$ .

Různých povrchových vlhkostí na betonových vzorcích bylo dosaženo:

- volným vysycháním v laboratoři až na požadovanou povrchovou vlhkost,
- sušením při  $50\text{ °C}$  až  $105\text{ °C}$  v délce 24 až 48 h (příp. více),
- nebo zkoušení při aktuální povrchové vlhkosti ihned po dosažení požadovaného stáří s jednodenním až třídenním uložení v laboratorních podmínkách.

#### 5.4.1 Výroba zkušebních těles a způsob zrání - Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.

Provzdušněný beton byl vyroben přímo na staveništi a zkušební tělesa byla vyrobena z betonu dovezeného autodomíchačem přímo na stavbu mostu Hradecká. Beton byl nalit do forem ve dvou vrstvách a zhutněn ocelovou tyčí. Horní povrch byl uhlazen zednickou lžící. Tělesa byla uložena na vodorovné ploše a zakryta PE fólií proti nadměrnému odpařování. Takto připravená tělesa tuhla na místě samém a po dvou až třech dnech byla převezena do laboratoří ÚSZK FAST Brno, kde byla odformována a ponechána na zrání v normálním laboratorním prostředí.



Obr. 89 Betonáž mostovky, při níž byly odebrány vzorky pro nedestruktivní zkoušky (fotoarchiv P. Cikrle)

#### 5.4.2 Výroba zkušebních těles a způsob zrání - Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech

Zkušební betonové dlaždice se vyráběly v laboratoři ÚSZK. Jednotlivé složky se dávkovaly hmotnostně s tolerancí max. 3 %. Míchání se provádělo v míchačce s nuceným oběhem, doma míchání min. 90 s, hutnilo se na vibračním stole ve dvou vrstvách. Při výrobě vzorků se dbalo na to, aby byl povrch betonu kvalitně uhlazen. Naplněné formy byly opatrně překryty neprodyšnou fólií po dobu 24 hodin a poté odformovány.

Zkušební tělesa byla uložena ve vodní lázni, 26 hodin před zkouškou byla vyjmuta, 24 hodin sušena při teplotě 105 °C a před samotným zkoušením byla tělesa temperována 2 hodiny v laboratorních podmínkách s teplotou  $21 \pm 2$  °C a relativní vlhkostí  $41 \pm 3$  %.



Obr. 90 Aplikace odbedňovacího přípravku



Obr. 91 Částečně naplněná dřevěná forma na vibračním stole



Obr. 92 Plnění dřevěné formy na vibračním stole ve dvou vrstvách



Obr. 93 Vibrace naplněné formy

#### **5.4.3 Výroba zkušebních těles a způsob jejich zrání - Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny**

Zkušební vzorky se vyráběly v laboratoři ÚSZK. Jednotlivé složky se dávkovaly hmotnostně s tolerancí max. 3 %. Vlákna se přidávala při dávkování hrubého kameniva před přidáním vody. Míchání se provádělo v míchačce s nuceným oběhem, doba míchání min. 90 s, hutnilo se na vibračním stole ve dvou vrstvách. Při výrobě vzorků se dbalo na to, aby byl povrch betonu kvalitně uhlazen. Naplněné formy byly opatrně překryty neprodyšnou fólií po dobu 24 hodin a poté odformovány.

Všechny sady vzorků volně zrály v laboratorních podmínkách s teplotou  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkostí  $41\text{ } \% \pm 3\text{ } \%$ , pouze druhá a třetí sada byla před zkoušením sušena při teplotě  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro docílení různých povrchových vlhkostí.

#### **5.4.4 Výroba zkušebních těles a způsob jejich zrání - Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti**

Zkušební vzorky se vyráběly v laboratoři ÚSZK. Jednotlivé složky se dávkovaly hmotnostně s tolerancí max. 3 %. Vlákna se přidávala při dávkování hrubého kameniva před přidáním vody. Míchání se provádělo v míchačce s nuceným oběhem, doba míchání min. 90 s, hutnilo se na vibračním stole ve dvou vrstvách. Při výrobě vzorků se dbalo na to, aby byl povrch betonu kvalitně uhlazen. Naplněné formy byly opatrně překryty neprodyšnou fólií po dobu 24 hodin a poté odformovány.

Všechny sady vzorků volně zrály ve vlhkém prostředí s relativní vlhkostí 95 % a teplotě  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### **5.4.5 Výroba zkušebních těles a způsob zrání - Experimentální měření v rámci projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu**

Zkušební vzorky se vyráběly v laboratoři ÚSZK. Jednotlivé složky se dávkovaly hmotnostně s tolerancí max. 3 %. Míchání se provádělo v míchačce s nuceným oběhem, doba míchání min. 90 s, hutnilo se na vibračním stole ve dvou vrstvách. Při výrobě vzorků se dbalo na to, aby byl povrch betonu kvalitně uhlazen. Naplněné formy byly opatrně překryty neprodyšnou fólií po dobu 24 hodin a poté odformovány.

Všechny sady vzorků byly prvních 25 dní uloženy ve vlhkém prostředí s relativní vlhkostí 95 % a teplotou  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ostatní dny do měření (min. 3 dny) volně zrály v laboratorních podmínkách s teplotou  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkostí  $41\text{ } \% \pm 3\text{ } \%$ .

## 5.5 ETAPA 5 – EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Etapa 5 popisuje cíle, z jakých důvodů bylo měření prováděno a jaké veličiny byly měřeny. Dále uvádí postupy provádění experimentálního měření, kdy se převážně jednalo o dva typy měření, a to: vlhkost – TPT– ISAT nebo vlhkost – TPT – GWT. Vyhodnocení naměřených dat bylo prováděno v programu Microsoft Excel 2010.

### 5.5.1 Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.

#### 5.5.1.1 Cíl experimentálních prací a měřené parametry

Cílem experimentálních prací bylo zjistit vliv vlhkosti a stárí na kvalitu povrchové vrstvy provzdušněného a neprovzdušněného betonu zkušebními přístroji TPT a ISAT.

#### 5.5.1.2 Postup experimentálního měření

- **Provzdušněný beton třídy C35/45 XF4**

Experimentální měření bylo prováděno nejdříve na trámcích a poté na dlaždicích. Na betonových trámcích se měřila povrchová vlhkost  $w$  kapacitním vlhkoměrem KAKASO a povrchová počáteční absorpce  $ISA_{10min}$ ,  $ISA_{30min}$  a  $ISA_{60min}$  přístrojem ISAT. Čtyři trávce byly postupně podrobeny 4 měřením a zkušební plochou byla nebedněná strana betonu (mimo trávce 6-10 %, kde byl nebedněný povrch značně hrbolatý).

První měření bylo provedeno na trávci bez vysušení ve stárí 21 dní, před druhým měřením byl vzorek ve stárí 28 dní sušen v laboratorní sušárně po dobu 48 hodin a teplotě 50 °C. Třetí měření bylo zahájeno ve stárí betonu 28 dní po 72 hodinovém sušení při teplotě 110 °C a čtvrté měření proběhlo na vzorku ve stárí 54 dní po 72 hodinovém sušení při teplotě 50 °C.

- **Neprovzdušněný beton třídy C35/45**

Na betonových dlaždicích ve stárí 6 měsíců se provádělo pouze měření součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$ . Ve stárí 2,5 roku se povrch betonu rozdělil na 3 zkušební místa. Na dvou zkušebních místech se postupně provádělo: měření povrchové vlhkosti  $w$ , měření součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$ , a součinitele vnitřní propustnosti  $k_1$ . Na jednom zkušebním místě se postupně zkoušelo: měření povrchové vlhkosti  $w$ , měření součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$ , a měření počáteční povrchové propustnosti  $ISA_{10min}$  a  $ISA_{30min}$ .

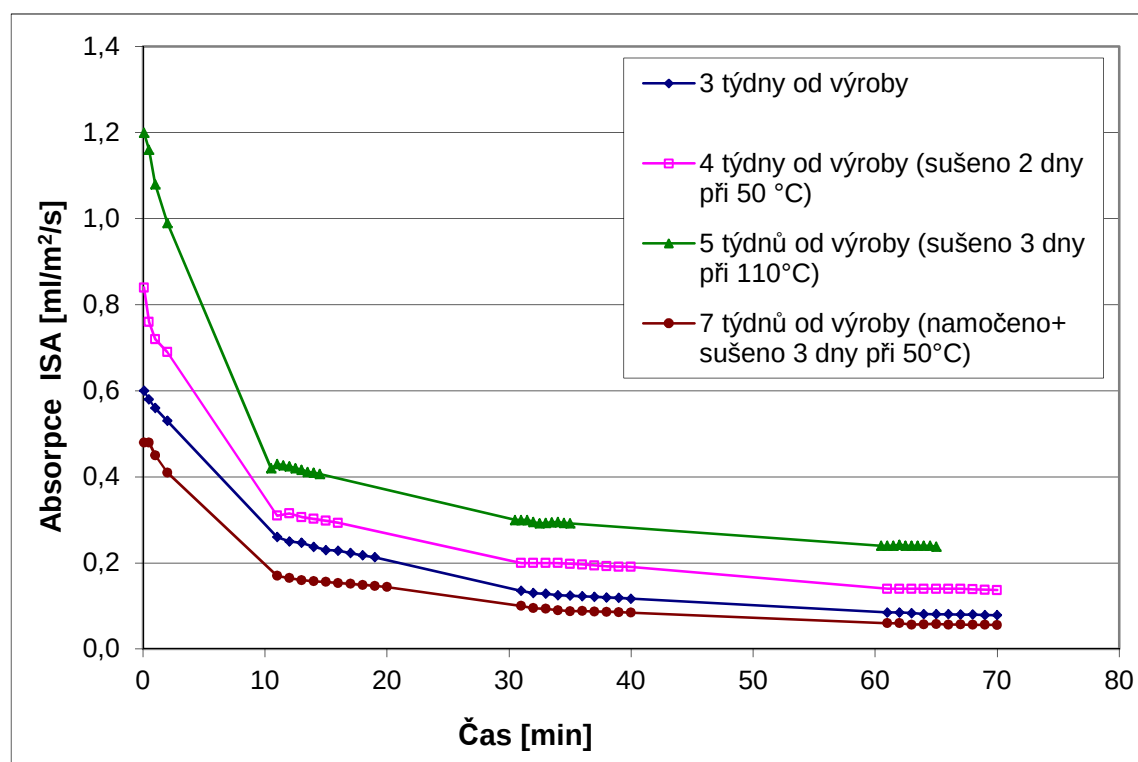
#### 5.5.1.3 Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané

Příloha č. 1 uvádí souhrnné výsledky experimentálního měření s OHL ŽS, a.s.:

- Tabulka A uvádí hodnoty měření  $ISA_{10min}$  a  $ISA_{30min}$  na trámcích při různých stupních sušení a stárí v rozmezí 21 až 54 dní, kde jsou detekovatelné významné rozdíly v závislosti na obsahu vzduchu,

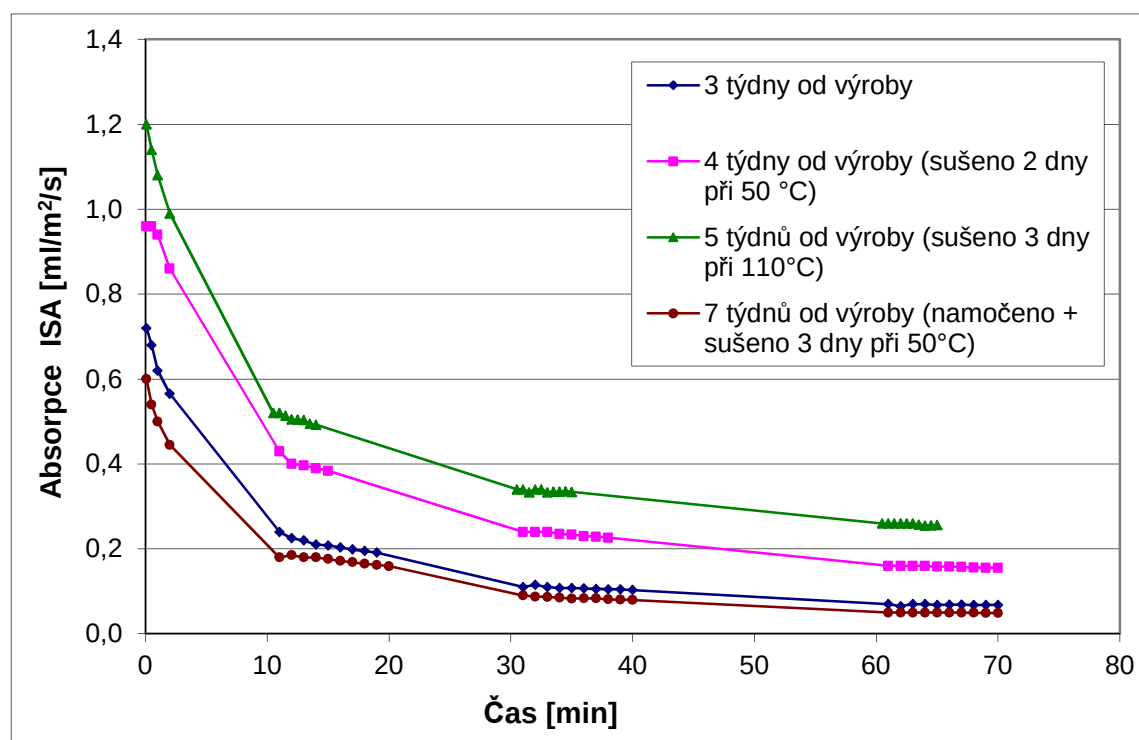
- Tabulka B porovnává hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 5 a 6 týdnů. Provzdušněné betony s obsahem vzduchu 2 % dosahovaly výrazně nižších průměrných hodnot součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  než betony s obsahem vzduchu 10%.
- Tabulka C porovnává hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 6 měsíců.
- Na stejných betonech byly změřeny hodnoty  $w$ ,  $k_T$ ,  $ISA_{10 \text{ min}}$  a  $ISA_{30 \text{ min}}$  ve stáří 2,5 roků (Tabulka D).
- Měření vzduchové a vodní propustnosti na dlaždicích ve stáří 2,5 roky uvádí Tabulka E.

Obr. 94 až 97 uvádějí průběh zkoušky ISAT, kdy je průběžně (v čase) měřeno množství vody, které se pod tlakem 0,02 bar vsákne do povrchu betonu. Čtyři grafy jsou rozděleny vždy podle trámů, na kterých bylo měření prováděno. Dva trámy byly s 2 % obsahem vzduchu a 2 trámy s 10 % obsahem vzduchu. Barevné křivky jsou rozděleny podle stáří a způsobu sušení betonových trámů před prováděním zkoušky.

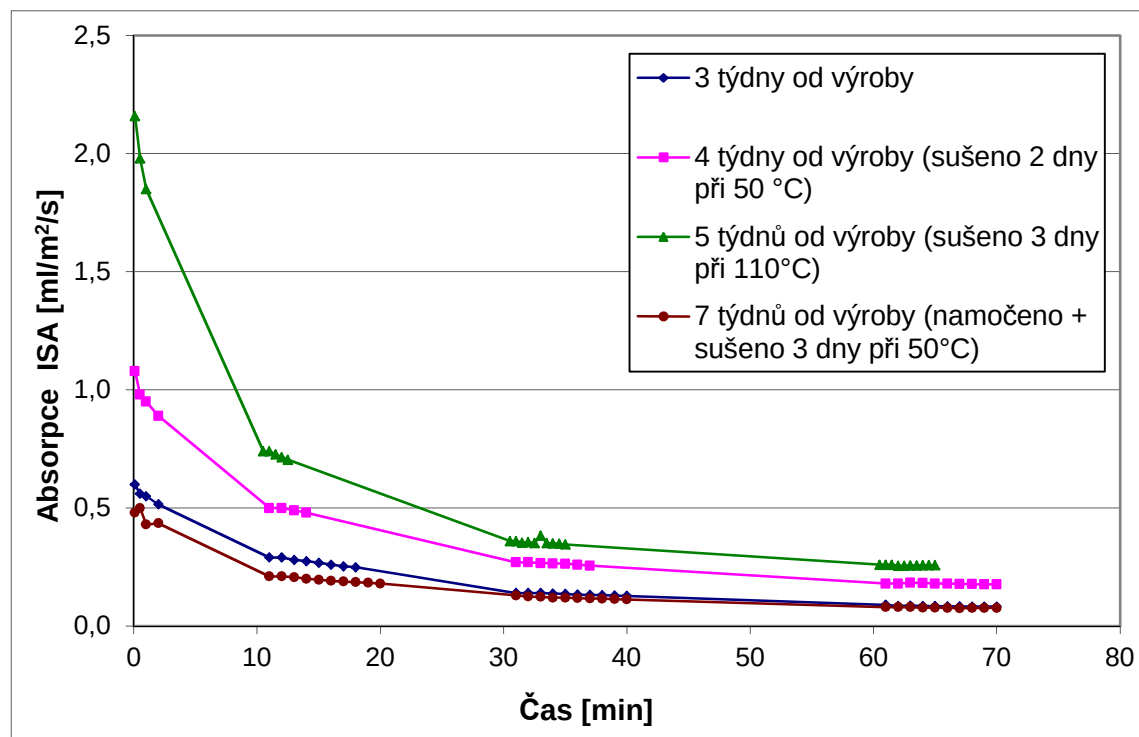


Obr. 94 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu 2 % - trámec 5

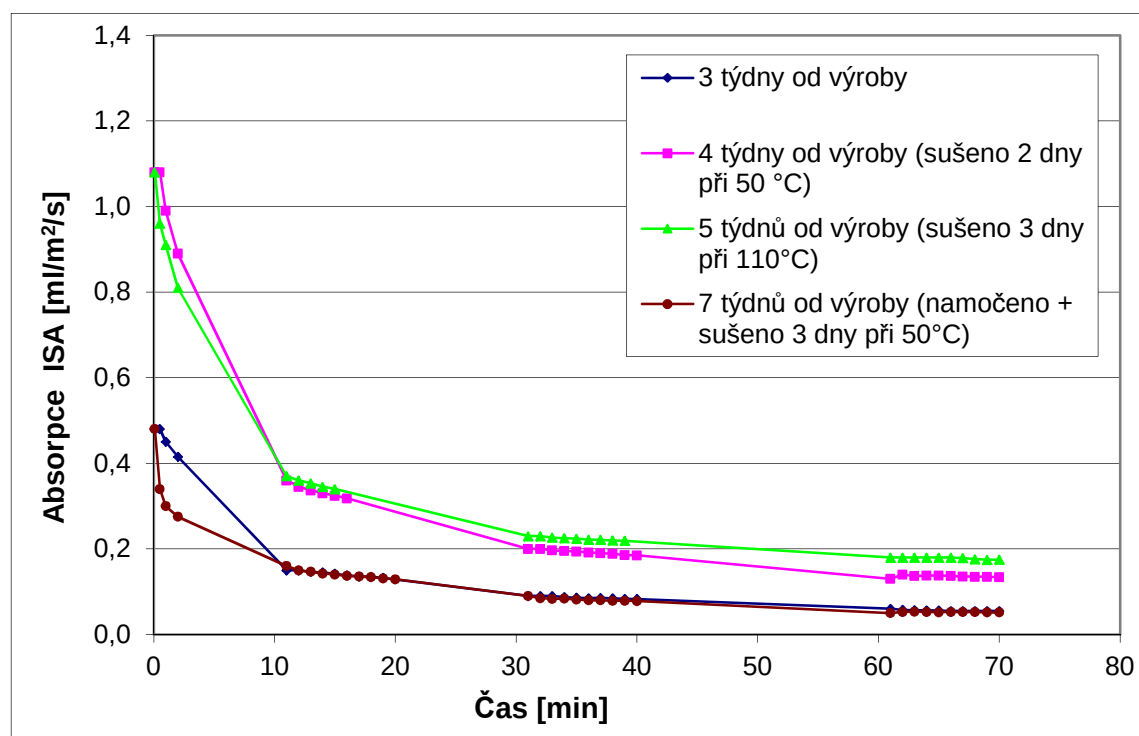




Obr. 95 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu 2 % - trámeč 6



Obr. 96 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu 10 % - trámeč 5



Obr. 97 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu 10 % - trámec 6 (měřeno na bedněné hraně)

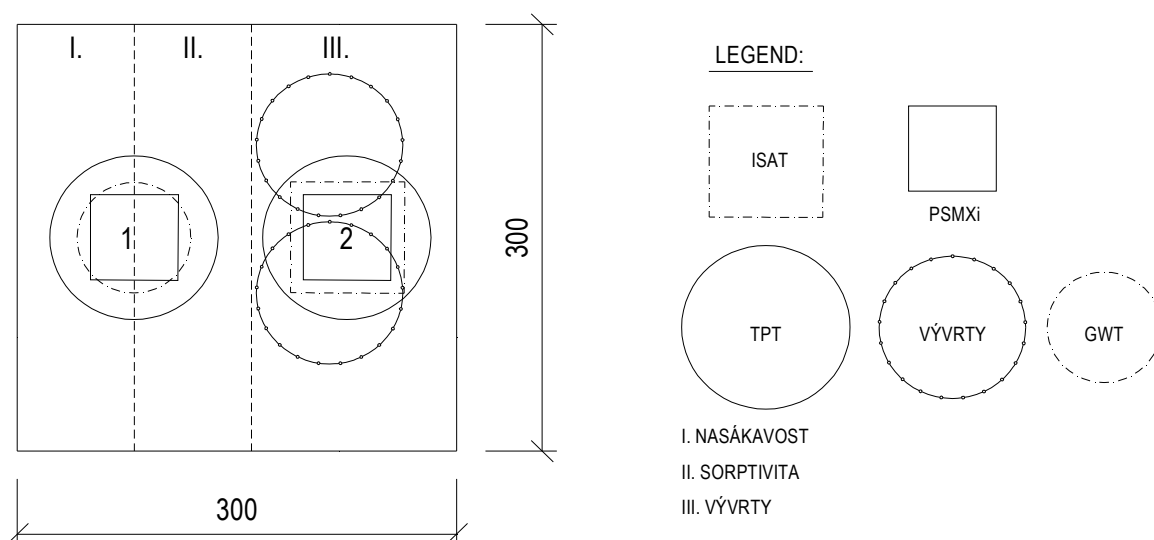
## 5.5.2 Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech

### 5.5.2.1 Cíl experimentálních prací a měřené parametry

Cílem experimentálních prací bylo zhodnotit vliv doby hydratace na vytvoření pórové struktury betonu, ověření jednotlivých vlastností betonů s rostoucí dobou zrání a získání údajů o tom, jak se projeví omezená doba hydratace na sledovaných vlastnostech betonu. Předpokládalo se, že nedostatkem vody v betonu se zastaví proces hydratace a tím i tvorba pórové struktury v povrchové vrstvě. Mezi sledované parametry patřily:  $w$ ,  $k_T$ ,  $k_1$ ,  $ISA_{10min}$ ,  $ISA_{30min}$ .

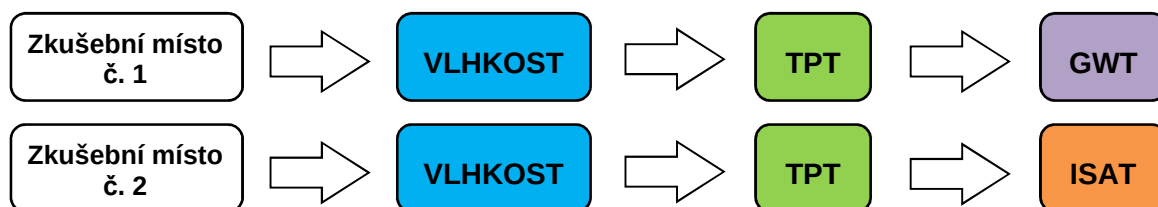
### 5.5.2.2 Postup experimentálního měření

Zkoušky na betonových dlaždicích všech zkušebních sad probíhaly vždy ve stejném sledu. Pro stanovení objemové hmotnosti byly zjištěny rozměry a hmotnost zkušebních těles. Dále byla betonová dlaždice rozdělena na dílčí části I., II. a III. a zkušební místa 1 a 2 (Obr. 98).



Obr. 98 Rozčlenění zkoušek na betonové dlaždici

Na zkušebním místě 1 se změřilo: povrchová hmotnostní vlhkost  $w$  kapacitním vlhkoměrem Kakaso (PSMXi), součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a následně součinitel vnitřní propustnosti  $k_1$  metodou GWT. Na zkušebním místě 2 se změřilo: povrchová hmotnostní vlhkost  $w$  kapacitním vlhkoměrem Kakaso (PSMXi), součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a následně a dále pro stanovení počáteční povrchové propustnosti  $ISA_{10min}$ ,  $ISA_{30min}$  a  $ISA_{60min}$  metodou ISAT. Postup je také patrný z následujícího obrázku.



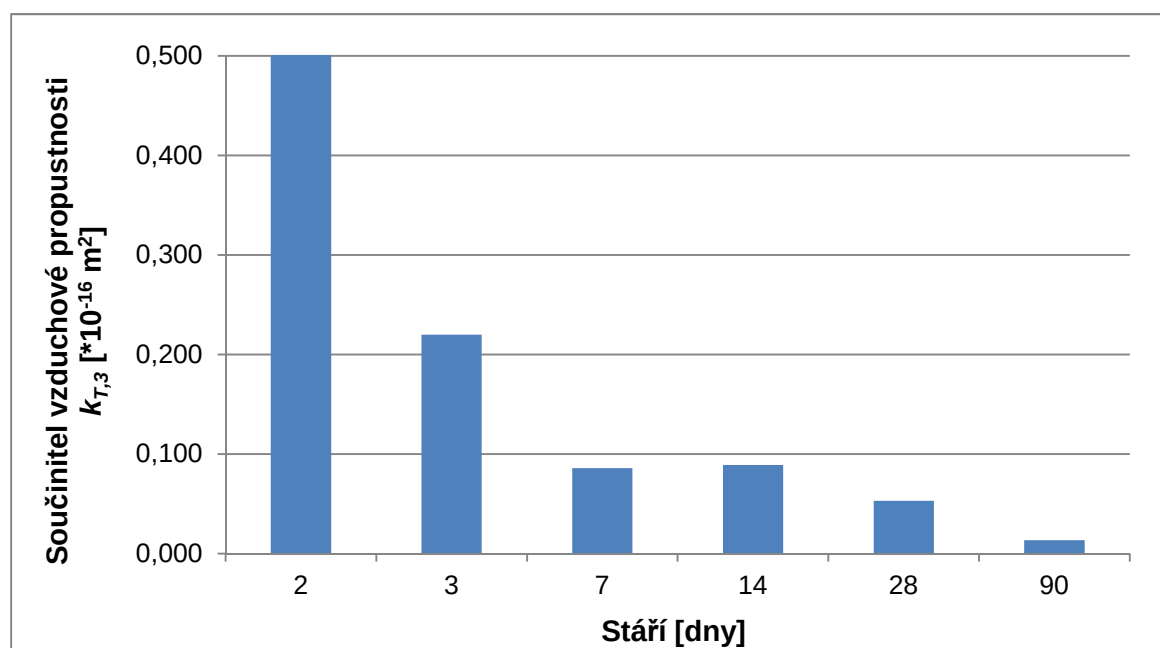
Obr. 99 Grafické znázornění postupu měření GAČR č. 103/09/0065 [VZ]

Následně byly ze zkušebních dlaždic v části III. odebrány jádrové vývrty pro stanovení obsahu vzduchových pórů. Zbývající část betonové dlaždice se rozřezala pro zkoušky nasákavosti (část I.) a sorptivity (část II.). Tyto výsledky již nejsou součástí této práce.

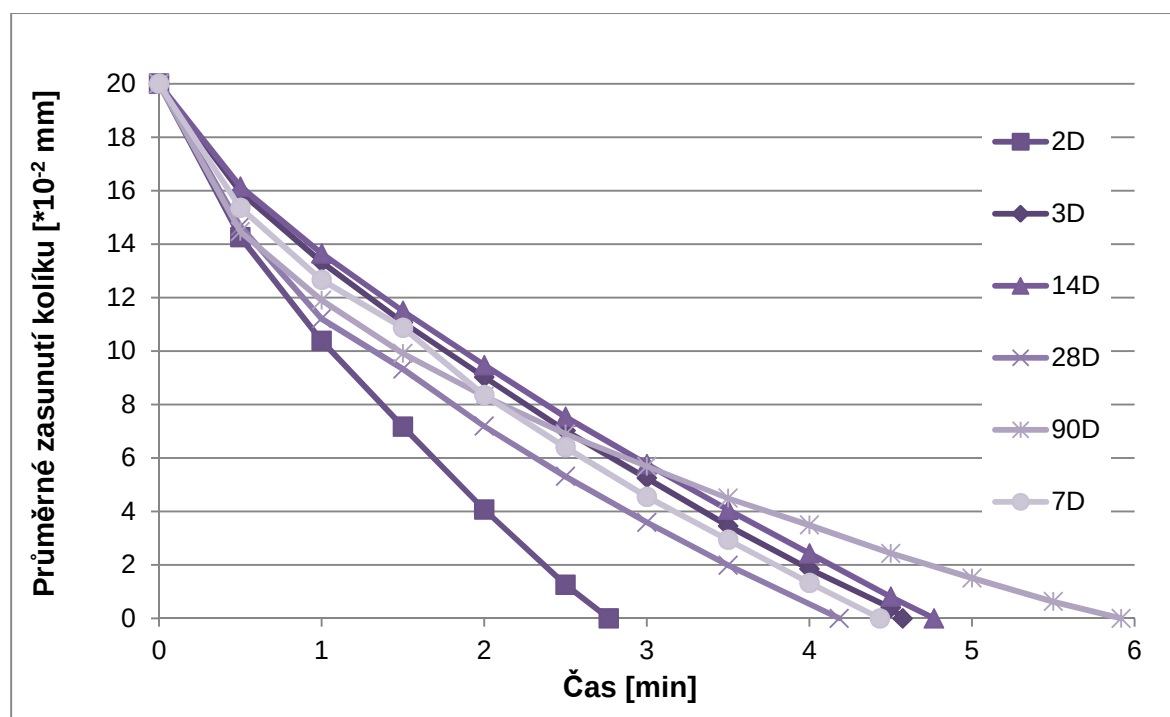
### 5.5.2.3 Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané

Příloha 2 uvádí kompletní výsledky v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech.

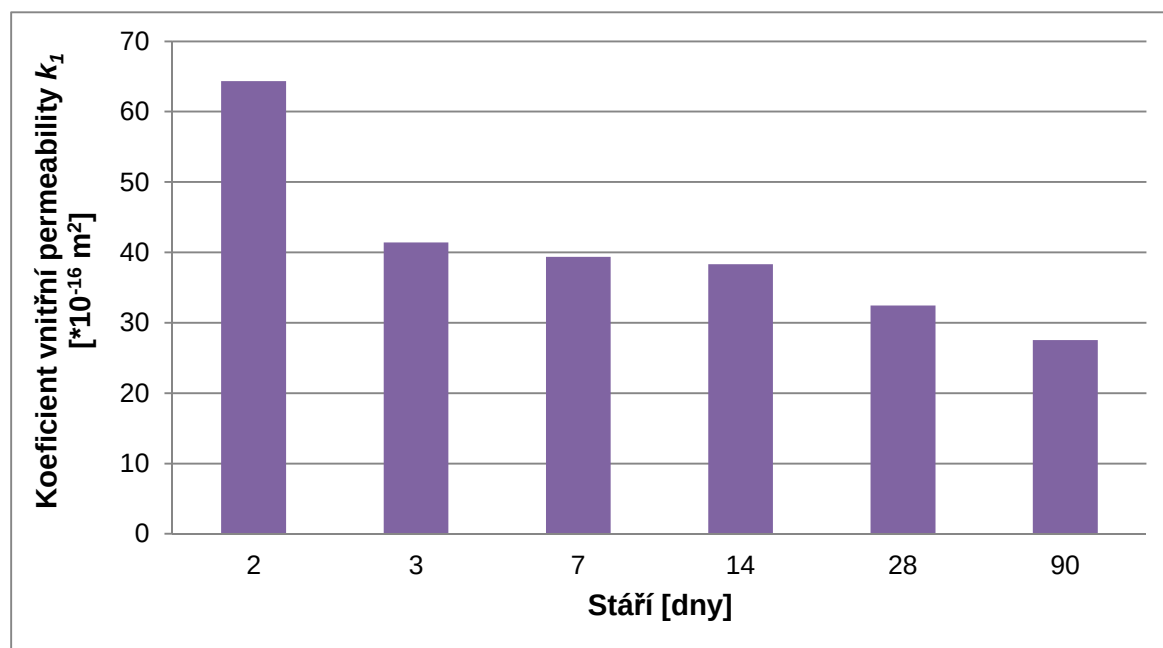
Obr. 100 porovnává hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_{T,3}$  ( $k_T$  přepočtený na srovnávací 3% vlhkost) na různě starých betonech (2 až 90 dní). Podrobné výsledky uvádí Příloha 2, Tabulka F.

Obr. 100 Závislost koeficientu vzduchové propustnosti  $k_{T,3}$  na stáří betonu

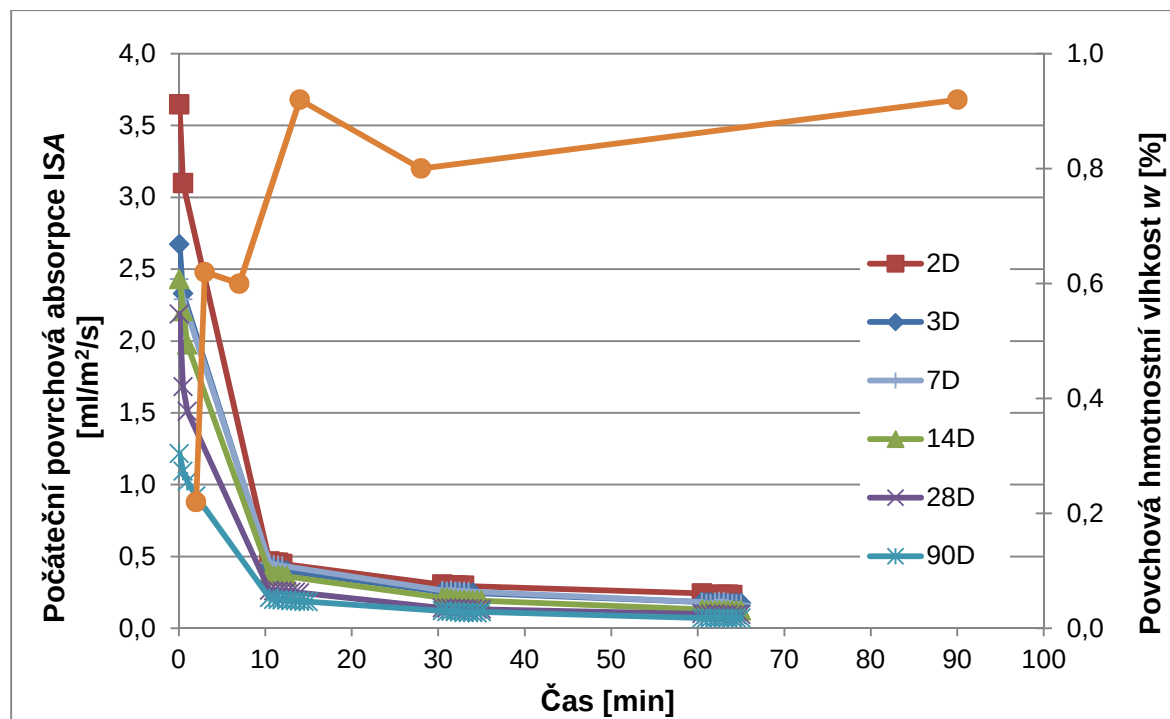
Následující obrázek Obr. 101 uvádí průběh měření metodou GWT v čase. Je zde patrné průměrné zasouvání měřicího kolíku, kdy nahrazuje objem vody vsáknuté do betonu při konstantním tlaku 0,2 baru. Obr. 102 uvádí konkrétní porovnání vyhodnocených hodnot součinitele vnitřní permeability  $k_1$  v závislosti na stáří betonu. Přesné výsledky jsou uvedeny v Příloze 2, Tabulka G.



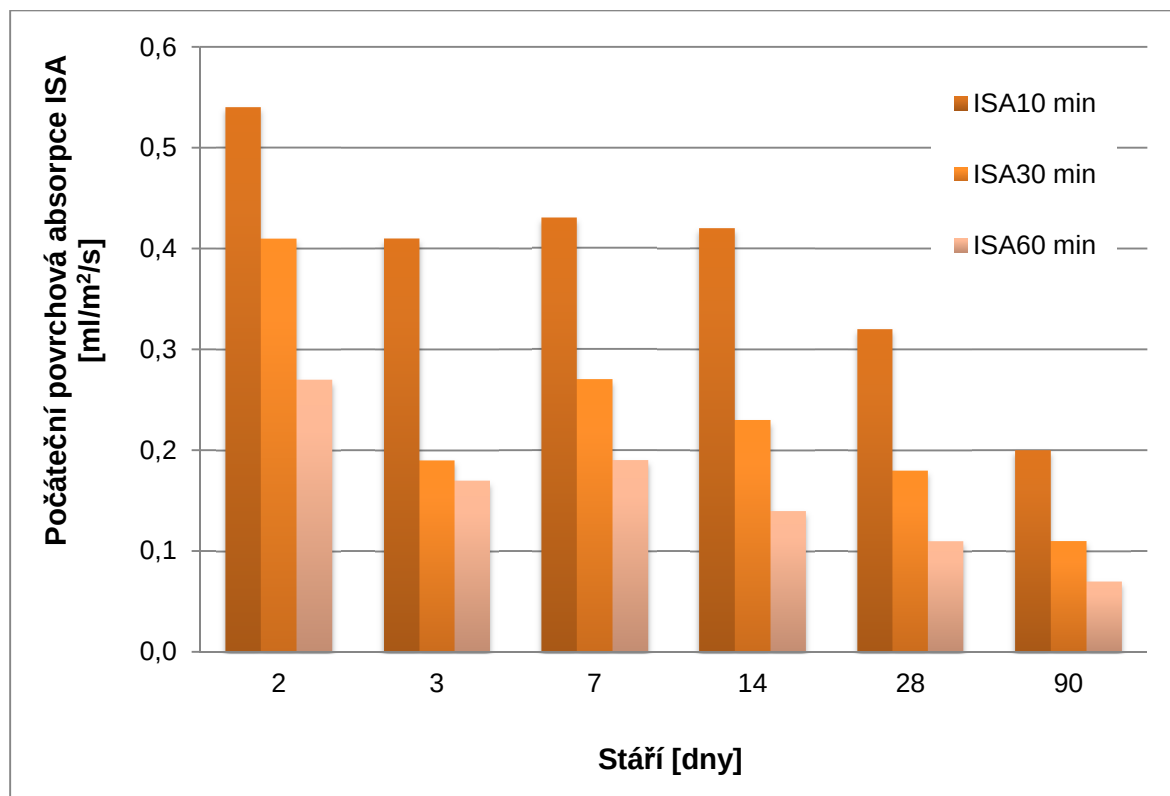
Obr. 101 Závislost úbytku tlakové vody na čase při zkoušce GWT

Obr. 102 Závislost koeficientu vnitřní permeability  $k_1$  na stáří vzorku

Vyhodnocení měření počáteční povrchové absorpce metodou ISAT je uvedeno v Příloze 2, Tabulka H, ale je také patrné z následujících obrázků. Obr. 103 zobrazuje průběh měření v čase, kdy ale nutné přihlídnout k aktuální povrchové vlhkosti  $w$ . Vyhodnocení naměřených hodnot  $ISA_{10 \text{ min}}$ ,  $ISA_{30 \text{ min}}$  a  $ISA_{60 \text{ min}}$  pro jednotlivá stáří (2 až 90 dní) je viditelné na Obr. 104.



Obr. 103 Závislost hodnoty ISA v čase



Obr. 104 Závislost hodnoty počáteční povrchové absorpce  $ISA$  na stáří betonu

### 5.5.3 Experimentální měření v rámci projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny a další dílčí měření

#### 5.5.3.1 Cíl experimentálních prací a měřené parametry

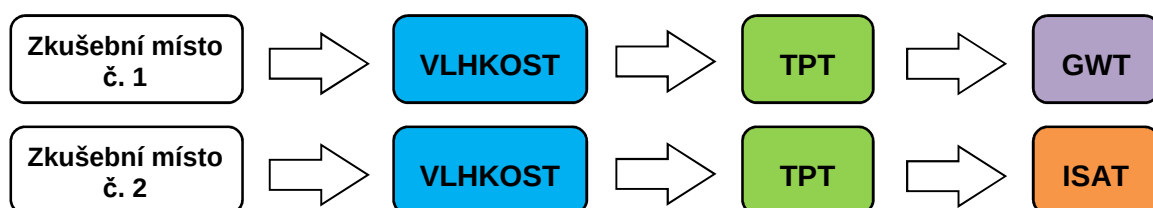
Cílem experimentálních měření bylo vytvořit počáteční soubor dat pro vytvoření přepočtových vztahů, kde naměřené hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$ , součinitele vnitřní propustnosti  $k_1$  a počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10\ min}$ ,  $ISA_{30\ min}$  a  $ISA_{60\ min}$  bude možné srovnávat při stejné 3% povrchové vlhkosti. Proto bylo nutné vytvořit soubor dat s hodnotami povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  od 1 % do 3 %, kde se sušením vzorků při teplotě 50 °C dosáhlo požadovaných vlhkostí.

Další dílčí měření byla zaměřena na sledování vlivu typu vláken a vodního součinitele na hodnotě součinitele vzduchové propustnosti  $k_{T3}$ .

#### 5.5.3.2 Postup experimentálního měření

Na zkušební betonové dlaždici byla vytvořena dvě zkušební místa. Na prvním místě byla nejdříve změřena povrchová vlhkost  $w$  kapacitní vlhkoměrem Kakaso, protože povrchová vlhkost výrazně ovlivňuje propustnost betonu, dále byl stanoven součinitel vzduchové

propustnosti  $k_T$  metodou TPT (Torrent Permeability Tester) a nakonec byl na stejném místě měřen součinitel propustnosti tlakovou vodou  $k_I$  metodou GWT (Germanns Water Permeability Tester) dánské firmy Germann Instruments. Na druhém zkušebním místě byla postupně měřena povrchová hmotnostní vlhkost  $w$  kapacitním vlhkoměrem Kakaso, součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a následně počáteční povrchová absorpce  $ISA_{10\ min}$  a  $ISA_{30\ min}$  přístrojem ISAT (Initial Surface Absorption Test).



Obr. 105 Grafické znázornění postupu měření FAST-J-10-96 [VZ]

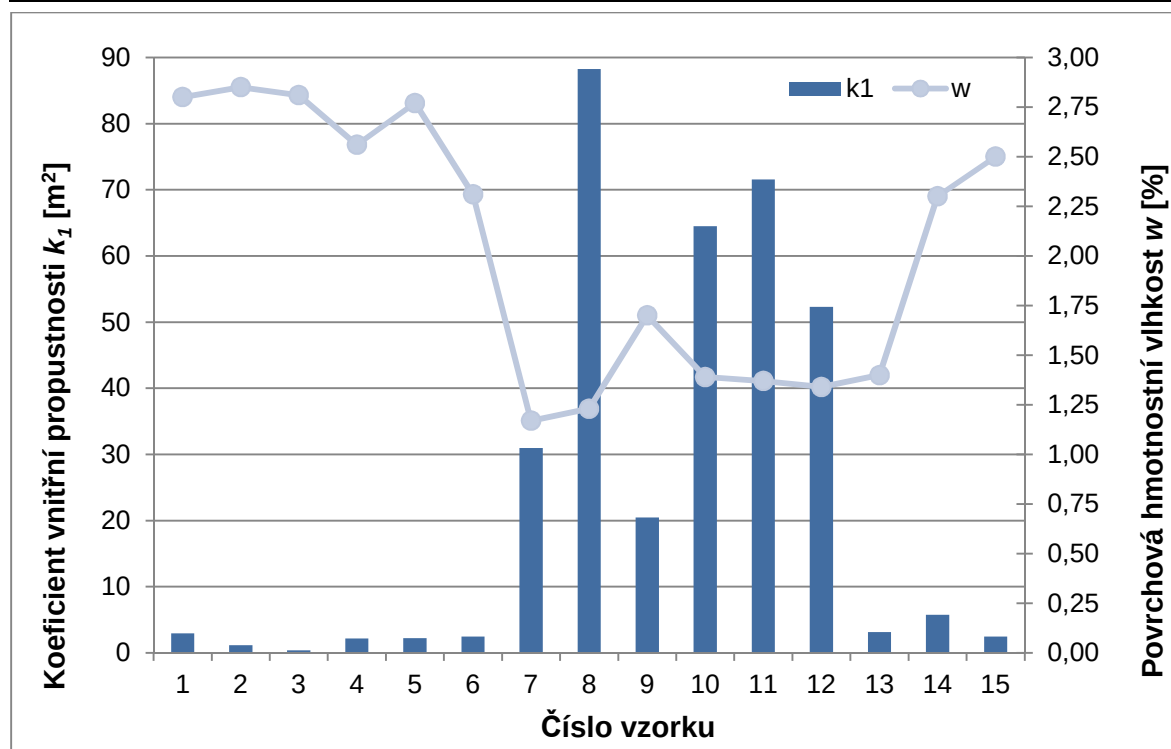
Měření na krychlích bylo prováděno vždy na bedněné ploše, kdy bylo na všech 5ti bedněných hranách změřeny hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  při aktuální vlhkosti  $w$ .

### 5.5.3.3 Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané

#### Měření na dlaždicích

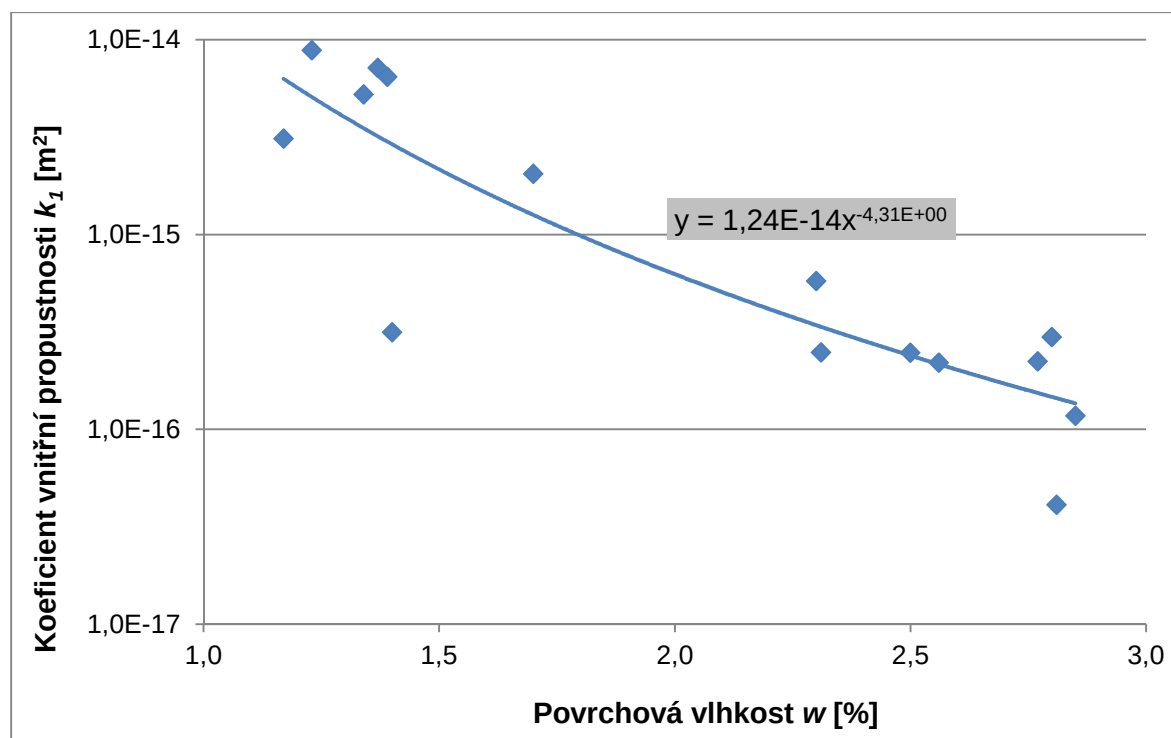
GWT: Tabulka I v Příloze 3, obsahuje hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$ , přepočet této hodnoty vzhledem k aktuální vlhkosti na srovnávací povrchovou vlhkost 3 % (dle metodiky zpracované na ÚSZK [43]) a index kvality krycí vrstvy betonu. Nechybí zde ani výsledky vodní propustnosti a hodnocení povrchové vrstvy betonu dle DIN 1045. Tyto výsledky jsou také patrné z Obr. 106.



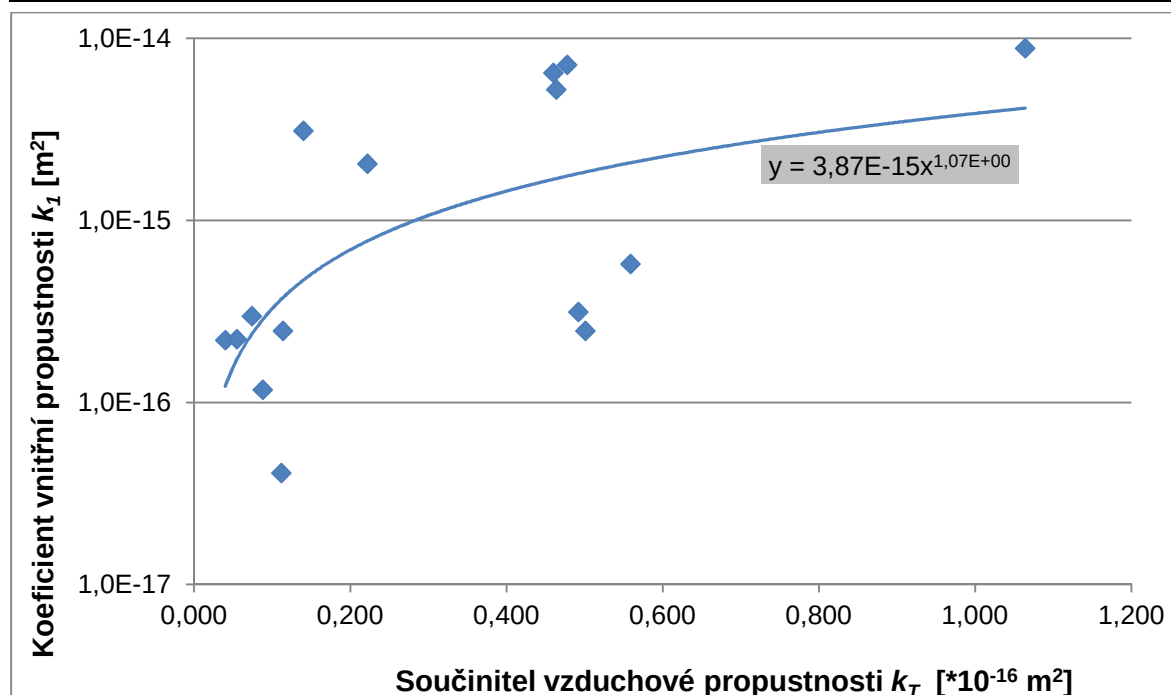


Obr. 106 Přehled naměřených výsledků koeficientu vnitřní propustnosti  $k_1$  na dílčích vzorcích

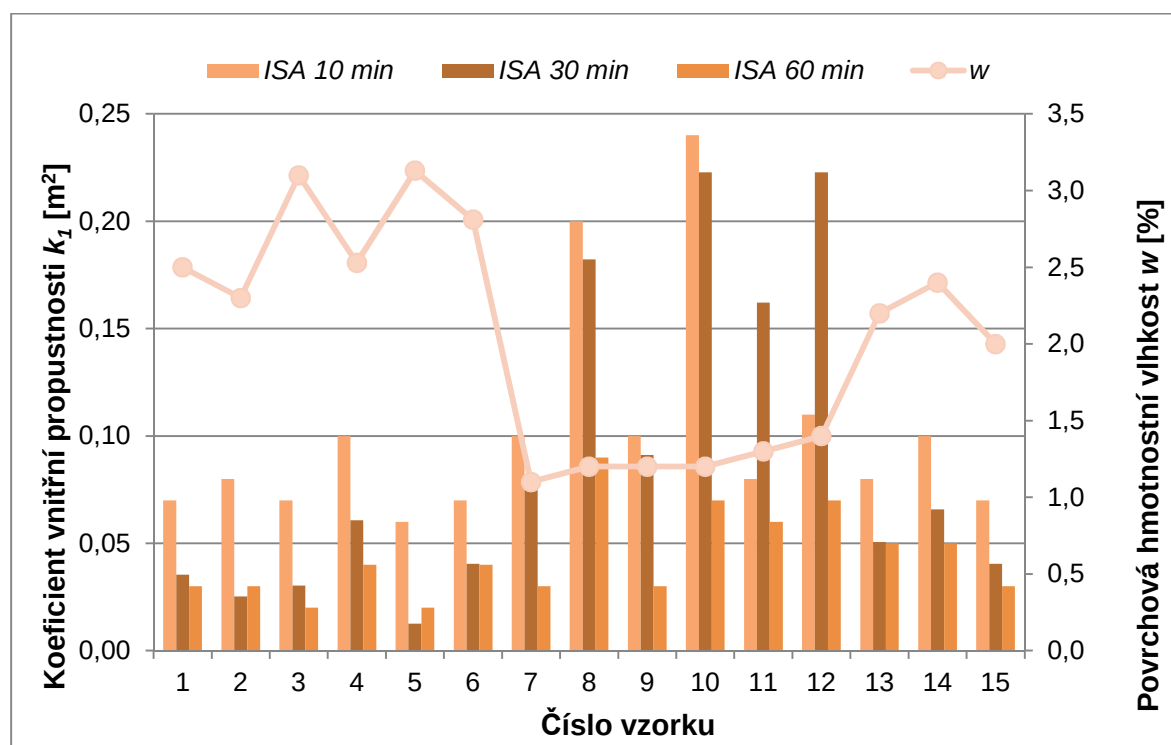
Cílem experimentálních bylo vytvořit vztahy mezi koeficientem vnitřní propustnosti  $k_1$  a povrchovou vlhkostí  $w$  a součinitelem vzduchové propustnosti  $k_T$ . Z níže uvedených Obr. 107 a Obr. 108 je patrná závislost mezi těmito veličinami.



Obr. 107 Závislost součinitele vnitřní permeability  $k_1$  na povrchové vlhkosti  $w$

Obr. 108 Závislost vnitřní permeability  $k_i$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$ 

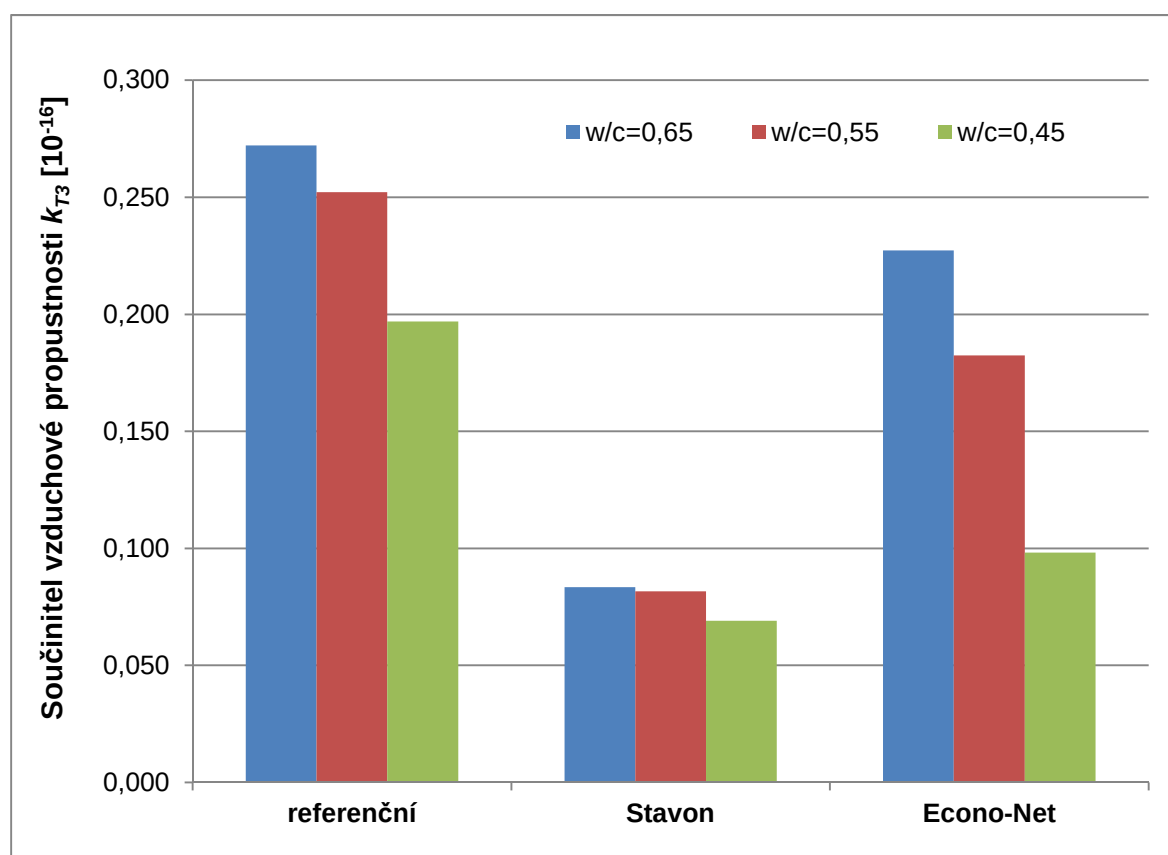
ISAT: Na 15ti površích betonových dlaždic byly měřeny hodnoty povrchové vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  a počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  a  $ISA_{30 \text{ min}}$ . Výsledky zkoušek jsou patrné Tabulky J, Příloha 3. Přepočet součinitele vzduchové propustnosti na 3% vlhkost byl proveden dle metodiky vypracované na ÚSZK [43].

Obr. 109 Povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$ ,  $ISA_{30 \text{ min}}$  a  $ISA_{60 \text{ min}}$  u dílčích vzorků

Z důvodu vytváření přepočtových vztahů byla vytvořena grafická znázornění (viz Příloha 3, Obrázek A až F), která ukazují na silnou závislost hodnoty  $ISA$  na povrchové vlhkosti  $w$  i na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$ .

### Měření na krychlích

Tabulka K až M v Příloze 3 uvádí naměřené hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  při aktuální vlhkosti  $w$  na betonech s různými vodními součiniteli a různými typy vláken. Schematicky je výsledek patrný z následujícího obrázku, kdy je vidět silný vliv vláken na hodnotu součinitele vzduchové propustnosti při 3% vlhkosti.



Obr. 110 Závislost typu vláken a vodního součinitele na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_{T3}$

### 5.5.4 Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti

#### 5.5.4.1 Cíl experimentálních prací a měřené parametry

Cílem experimentálních prací bylo vyrobit zkušební vzorky pro dlouhodobá měření počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  a  $ISA_{30 \text{ min}}$ , a stanovit vliv stárí na povrchovou počáteční absorpci i na propustnost betonu pro vzduch. Měření byla prováděna ve stárí

2 roky. Důležitým dílčím cílem bylo také zhodnotit stav normalizace pro stanovení počáteční povrchové absorpce jako podklad pro tvorbu nové metodiky.

#### 5.5.4.2 Postup experimentálního měření

Měření byla prováděna na betonových dlaždicích o rozměrech 300x300x80 mm, kdy se na jedné dlaždici zvolily až čtyři zkušební místa.

Na zkušebním místě se nejdříve stanovila hmotnostní vlhkost  $w$  kapacitním vlhkoměrem Kakaso, součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  vyjádřený v  $10^{-16}$  násobku  $m^2$  metodou TPT (Torrent Permeability Tester) a nakonec se měřila počáteční povrchová absorpce  $ISA$  v  $ml/m^2/s$  metodou ISAT (Initial Surface Absorption Test). Postup zkoušení je také patrný z následujícího Obr. 111.



Obr. 111 Grafické znázornění postupu měření FAST-J-11-12 [VZ]

#### 5.5.4.3 Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané

V Příloze 4, Tabulka N jsou uvedeny výsledné hodnoty povrchové vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  a hodnot  $ISA_{10\ min}$  i  $ISA_{30\ min}$  ve stáří 2 roky. Od každé veličiny bylo naměřeno 110 hodnot.

V Příloze 4, Obrázek G až J jsou uvedeny závislosti vytvořené v MS Excel:

- hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 2 roky
- hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 2 roky
- součinitele  $k_T$  na hodnotě  $ISA_{10\ min}$ ; stáří 2 roky
- součinitele  $k_T$  na hodnotě  $ISA_{30\ min}$ ; stáří 2 roky

Jedná se o cenné podklady pro tvorbu přepočtových vztahů, které významným způsobem přispějí k pozitivním závěrům z této práce.

#### 5.5.4.4 Stav normalizace pro stanovení počáteční povrchové absorpce

V současné době jsou autoři známi pouze 2 dokumenty, které se snaží blíže specifikovat práci s přístrojem ISAT. Jedná se o britskou normu BS 1881/208 [16] a operační postup s názvem „Operating Instructions Initial Surface Absorption Test 35-3985, 35-3989, 35-3993“ [15] vydaný společností ELE International.

#### A) Britská norma BS 1881/208

Část 208 britské normy 1881 „Testing concrete“ je zaměřena na doporučení pro stanovení počáteční povrchové absorpce betonu. Norma je přehledně členěna do 11ti kapitol. *První kapitola* uvádí rozsah použití metody na betonu vzhledem k stavu vlhkosti ve vzorku. *V druhé kapitole* jsou zmíněny odkazy na normy a další informativní odkazy. *Třetí kapitola* se zabývá definicemi a jsou v ní přesně specifikovány pojmy umístění, počáteční povrchová absorpce a zkušební místo. *Čtvrtá kapitola* definuje oblasti použití metody a zaměřuje se na kontrolu kvality zkušebních vzorků. *Pátá kapitola* pojednává o faktorech ovlivňující povrchovou absorpci betonu, které ovlivňují interpretaci výsledků. Jsou zde zmíněny již známé faktory jako vlhkostní podmínky, složení betonové směsi, druh kameniva, typ povrchové úpravy a způsob vibrace, ošetřování, stáří betonu, trhliny, typ vody a teplota. *V šesté kapitole* je popsána sestava zkušebního zařízení s odkazem na obrázek, který je obdobný s Obr. 71. Je zde též uvedeno, že skleněná kapilára má být min. 200 mm dlouhá s poloměrem v rozmezí 0,4 až 1,0 mm. Také jsou zde specifikovány zařízení, které se při zkoušce používají. *Sedmá kapitola* řeší otázku kalibrace konkrétního zařízení podle průměru skleněné kapiláry a následnou úpravu stupnice. *V osmé kapitole* je popsán postup zkoušení. Norma uvádí, že minimální počet zkušebních vzorků jsou 3 a pro zkoušení nemá být vybíráno místo s trhlinou. Zkušební vzorky je třeba sušit při  $105 \pm 5$  °C do konstantní hmotnosti. Před zkoušením je nutné umístit vzorek do klimatizované komory. Nesušené vzorky mají být 48 h před zkoušením umístěny v klimatizační komoře při teplotě  $20 \pm 2$  °C a 12 h před a během testu chránit před sluncem. Důležité je správné upevnění a sledování neprotékavosti vody během testu. Obvyklý interval čtení (tzv. Primární interval čtení\*) je 10 min, 30 min a 1 h. od začátku testu. Dále norma specifikuje způsob určení obvyklého intervalu čtení ze Základního testu\* dle následující tabulky.

Tab. 30 Klasifikace Základního testu\* a určení intervalu měření počáteční povrchové absorpce metodou ISAT [16]

| Stanovení doby podle pohybu menisku tzv. Základní test*           |                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Počet dílků za 5 s od počátku testu                               | Perioda, během které bude pohyb měřen (tzv. Sekundární interval čtení *)         |
| < 3                                                               | 2 min                                                                            |
| <b>3 až 9</b>                                                     | <b>1 min</b>                                                                     |
| 10 až 30                                                          | 30 s                                                                             |
| > 30                                                              | max. počet, počáteční absorpce je $> 3,6 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ |
| Poznámka: 1 dílek = $0,01 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ |                                                                                  |

\* Pojem není specifikován normou, pro snadnější interpretaci jej užívá autorka.

Jako začátek testu (měření) se považuje okamžik, kdy meniskus vody protne na stupnici značku 0,0, a v tomto okamžiku pouštíme stopky. Jestliže Základní test\* stanovil Sekundární

interval čtení\* 2 min nebo 30 s, musí být výsledky převedeny na čtení v periodě 1 min. Je-li čtení po 10 min od začátku měření menší než  $0,05 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , měření je zastaveno a zaznamená se výsledek s komentářem "nepropustný beton, citlivý při dlouhodobějších testech". Jestliže je po 10 min. čtení větší než  $3,60 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , měření je zastaveno a zaznamená se výsledek s komentářem „příliš propustný beton, bez citlivosti zkušební metody“. Mezi primárními intervaly čtení\*, kdy neprobíhá sekundární interval čtení\*, uvolníme objímku (svorku) a udržujeme úroveň vody v nálevce na stanovenou hodnotu.

*Devátá kapitola* se zabývá faktory ovlivňujícími výsledky testů, kde je řečeno, že interpretace výsledků je závislá na účelu a použití zkušebního zařízení. Dále se uvádí, že jsou-li vzorky ukládány do klimatizované komory, zbytková vlhkost není vysoká. Její změna nastává s dobou trvání zkoušky. V některých případech lze považovat za dostatečné 10 min. testy, avšak s ohledem na vlhkost zkušebního místa. Je-li teplota odlišná od  $20^\circ\text{C}$ , je třeba vzhledem k odlišné viskozitě vody provést přepoččet na hodnotu při  $20^\circ\text{C}$ . Desátá kapitola pojednává o přesnosti a v jedenácté kapitole jsou uvedeny náležitosti protokolu ze zkoušky, tj. a) datum, čas a místo zkoušky; b) stáří betonu v testu (pokud je známo); c) označení a popis zkušebního vzorku; d) případně umístění prvku; e) zkoušená místa, případně s náčrtem; f) podrobný popis povrchu betonu; g) orientace zkušební plochy (horizontální, vertikální nebo opačný směr); h) popis formování před zkouškou (včetně tepelného ošetření); i) způsob těsnění; j) plocha kontaktu s vodou pod akrylátovou komůrkou, délkou kapiláry a průměr; k) teplota povrchu betonu; l) všechny počáteční povrchové absorpce vyhodnocování výsledků testu  $\text{ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , m) výsledky opravené na ekvivalent  $20^\circ\text{C}$  teploty.

## **B) Operační postup s názvem „Operating Instructions Initial Surface Absorption Test 35-3985, 35-3989, 35-3993**

Sedmikapitolový operační postup s názvem „Operating Instructions Initial Surface Absorption Test 35-3985, 35-3989, 35-3993“ (dále jen Operační postup ISAT“) [15] vydaný společností ELE International, jakožto výrobce zařízení, uvádí podstatně méně instrukcí než výše popisovaná britská norma.

*První kapitola* se zabývá úvodem do problematiky a je zde mimo jiné řečeno, že se jedná o jednoduchý test pro určení průtoku suchou vrstvou betonu v čase. Jsou zde uvedeny principy a omezení při použití metody. V *druhé kapitole* je podrobně popsáno měřicí zařízení, včetně přesných parametrů (průměr 1,9 mm, délka asi 240 mm) a umístění skleněné kapiláry (200 mm nad zkušební plochou), zkušební plochy (průměr 85 mm, plocha  $5674,5 \text{ mm}^2$ ), stupnice ( $1 \text{ dílek} = 0,01 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) atd. *Třetí kapitola* je zaměřena na provozování měřicího přístroje, především na nastavení, průběh testu a výpočet. Test se provádí s destilovanou nebo převařenou vodou a trvá 2 hodiny. Je zde uvedeno, že Primární interval čtení\* je 10 min, 30 min, 1 h a 2 h, a také vztah výpočtu průtoku pro zkušební interval 1 min. Ve čtvrté

kapitole je uveden obsah, který by měla obsahovat zpráva z měření, tj. výsledky testu, popis vzorku, umístění, stáří vzorku, orientace plochy, vlhkost před testem, obsah zkušební plochy. Výsledky mají být uvedeny po 10 min, 30 min, 1 h a 2 h. I když je v úvodní kapitole napsáno, že viskozita vody ovlivňuje průtok skrz povrchovou vrstvu, není zde uvedeno, že by se měla teplota zaznamenávat. V *páté kapitole* je popsána kalibrace skleněné kapiláry s odkazem na obrázek znázorňující postup kalibrace. *Šestá kapitola* se zabývá výpočtem průměru skleněné kapiláry z testu v závislosti na viskozitě vody. V závěrečné sedmé kapitole je popsán postup pro přípravu měřítka dle konkrétního průměru kapiláry tak, aby 1 dílek = 0,01 ml/(m<sup>2</sup>.s).

### **C) Rozdíly mezi BS 1881/208 a Operačním postupem ISAT**

Mezi výše popsanými dokumenty jsou patrné rozdíly, které vychází především z jejich účelu a použití. Britská norma je obecnější a stanovuje obecná kritéria, která musí zkušební zařízení splňovat. Uvádí minimální a maximální rozměry části zkušebního zařízení a intervaly měření. Dále poukazuje na faktory, které průběh měření mohou ovlivňovat. Operační postup je zaměřen na konkrétně dodávané zařízení, ale ne ve všech ohledech. Kalibraci a následnou úpravu stupnice si musí každý uživatel udělat sám. Dokument však postrádá některé důležité údaje, jako např. sekundární interval měření. Další nevýhodou je prodlužování testu, kdy Operační postup doporučuje Primární interval doplnit o měření po 2 h. Hlavní rozdíly obou dokumentů jsou uvedeny v tabulce Tab. 31.



Tab. 31 Hlavní rozdíly mezi BS 1881/208 a Operačním postupem ISAT

| Porovnání Britské normy a Operačního postupu ISAT - Klady a zápory                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Britská norma BS 1881/208 [16]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Operační postup ISAT [15]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <p>→ <b>Vymezení standardu měřicího zařízení a postupu při zkoušení</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ přehledné zpracování, obsahuje obrázky s pojmy a rozměry zařízení</li> <li>+ definuje pojmy</li> <li>+ kratší test než u OP - primární interval měření* je 10 min, 30 min, 1 h. OP má navíc 2h</li> <li>+ specifikuje zařízení, která jsou k testu potřeba i s parametry (klimatizační komora, stopky a jejich přesnost, ...)</li> <li>- není uvedena konkrétní metodika hodnocení, pouze vyjmenovány faktory, které ovlivňují průtok</li> <li>- není uveden výpočetní vztah pro průtok a jiné přepočty</li> <li>- protokol z měření musí obsahovat více informací, ale není uvedeno, jakým způsobem všechny parametry zohlednit</li> <li>- neumožňuje přepočet na aktuální vlhkost, ale vzorek musí být před zkouškou umístěn v klimatizační komoře</li> <li>- výsledek zkoušky v <math>\text{ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})</math> se špatně porovnává s jinými testy</li> </ul> | <p>→ <b>Operační postup vytvořený výrobcem konkrétního zařízení</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- neodvolává se na BS</li> <li>- méně informací o zkoušce než v BS</li> <li>- uvádí princip měření, ale nedefinuje pojmy</li> <li>- zkouška se výrazně prodlužuje - primární interval měření* je 10 min, 30 min, 1 h a 2 h, poslední interval BS nemá</li> <li>- nespecifikuje zařízení potřebná ke zkoušce</li> <li>- uvádí průměr kapiláry 1,9 mm a na tento průměr dodává stupnici, ale uživatel musí provést kalibraci a stupnici si na nový průměr upravit</li> <li>- neuvádí sekundární interval měření*</li> <li>+ uvádí výpočetní vztah pro průtok s intervalem 1 min</li> <li>+ je graficky znázorněn postup kalibrace</li> <li>- do protokolu ze zkoušky se neuvádí teplota</li> <li>- uvádí, že je nutné uvést měřicí plochu, ale neuvádí, jakým způsobem to ve výpočtu zohlednit</li> <li>- neuvádí zohledňování teploty vzorky ani vody při samotném měření</li> <li>- výsledek zkoušky v <math>\text{ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})</math> se špatně porovnává s jinými testy</li> </ul> |

#### D) Další informace o ISAT

Metoda ISAT je velmi uznávanou metodou a jejím využitím se zabývá mnoho vědeckých pracovišť. Z rozsáhlých výzkumů byla vytvořena klasifikace povrchové vrstvy betonu dle výsledků z měření metodou ISAT (Tab. 32). Britská norma BS 1881/208 ani Operační postup ISAT tuto klasifikaci výsledků neuvádějí.

Tab. 32 Klasifikace povrchové vrstvy betonu metodou ISAT [2]

| Absorpce<br>betonu | Výsledky zkoušky ISAT [ml/m <sup>2</sup> /s] |             |             |             |
|--------------------|----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                    | Čas od začátku testu                         |             |             |             |
|                    | 10 min.                                      | 30 min.     | 60min.      | 120 min.    |
| <b>Vysoká</b>      | > 0,50                                       | > 0,35      | > 0,20      | > 0,15      |
| <b>Střední</b>     | 0,25 ~ 0,50                                  | 0,17 ~ 0,35 | 0,10 ~ 0,20 | 0,07 ~ 0,15 |
| <b>Nízká</b>       | < 0,25                                       | < 0,17      | < 0,10      | < 0,07      |

Při průzkumu odborné literatury o měřicím zařízení ISAT byla nalezena i velmi zajímavá tabulka (Tab. 33), která srovnává výsledky testů s jinými metodami.

Tab. 33 Obecný vztah mezi propustností a zkouškou absorpce na suchém betonu [2]

| Metoda                                                                                                                    | Propustnost betonu / absorpce |                     |                                       |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|                                                                                                                           | jednotka                      | nízká               | střední                               | vysoká              |
| <b>Vnitřní propustnost <math>k_1</math></b>                                                                               | m <sup>2</sup>                | < 10 <sup>-19</sup> | 10 <sup>-19</sup> ~ 10 <sup>-17</sup> | > 10 <sup>-17</sup> |
| <b>ISAT 10 min</b>                                                                                                        | ml/m <sup>2</sup> /s          | < 0,25              | 0,25 ~ 0,50                           | > 0,50              |
| <b>Figg – vodní propustnost</b>                                                                                           | s                             | > 200               | 100 ~ 200                             | < 100               |
| <b>Figg – modifikovaný – vzduch</b>                                                                                       | s                             | > 300               | 100 ~ 300                             | < 100               |
| <b>BS vodní absorpce – 30 min</b>                                                                                         | %                             | < 3                 | 3 ~ 5                                 | > 5                 |
| <b>DIN 1046 – 4 dny</b>                                                                                                   | mm                            | < 30                | 30 ~ 60                               | > 60                |
| Přibližné hodnoty pro vodu při 20 °C je $K_w=9,75 \cdot 10^6 k$ m/s a pro vzduch při 20 °C je $K_g=6,5 \cdot 10^5 k$ m/s. |                               |                     |                                       |                     |

## E) Závěr

I když od vydání britské normy BS 1881/208:1996 a Operačního postupu ISAT z roku 2003 uběhlo již mnoho let, stále neexistuje dokument, který by metodu počáteční povrchové absorpce ISAT více specifikoval. Velkým nedostatkem obou dokumentů je, že ani jeden z nich neobsahuje klasifikaci povrchové vrstvy betonu z hlediska trvanlivosti. Stále také neexistuje korelační vztah, který by přepočítal výsledek testu na srovnávací 3% vlhkost. Normalizace má velké rezervy, a proto je nutné pracovat na vytvoření jednotné metodiky, která by odstranila nedostatky obou dokumentů a doplnila korelační závislosti mezi povrchovou hmotnostní vlhkostí a počáteční povrchovou absorpcí.

### 5.5.5 Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možnosti stanovení a způsobu hodnocení kvality povrch. vrstev betonu

#### 5.5.5.1 Cíl experimentálních prací a měřené parametry

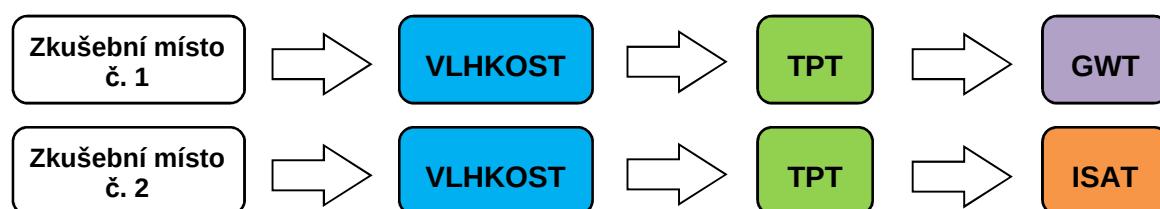
Cílem hlavní části experimentálních prací bylo vytvořit dostatečně kompaktní soubor naměřených dat, které budou sloužit jako podklad pro vytvoření přepočtových vztahů mezi metodami TPT a ISAT.

#### 5.5.5.2 Postup experimentálního měření

Postup experimentálního měření byl totožný s postupem měření jako u „FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti“ i jako u „FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny“. Hlavním rozdílem bylo složení betonu a množství zkušebních míst na betonové dlaždici o rozměrech 300x300x80 mm, kdy po desítkách předchozích měření s mnoha praktickými zkušenostmi bylo možné zkušební plochu rozdělit na dvě až čtyři zkušební místa:

Na jednom zkušebním místě se stanovila hmotnostní vlhkost  $w$  kapacitním vlhkoměrem Kakaso, součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  vyjádřený v  $10^{-16}$  násobku  $m^2$  metodou TPT (Torrent Permeability Tester) a nakonec se provedlo měření počáteční povrchové nasákavosti v  $ml/m^2/s$  metodou ISAT (Initial Surface Absorption Test).

Na druhém zkušebním místě se Kakasem stanovila povrchová vlhkost  $w$ , posléze se změřila vzduchová propustnost  $k_T$  metodou TPT a na závěr se stanovil součinitel vnitřní propustnosti  $k_1$  v  $m^2$  metodou GWT (Germann Water Permeability Tester). Na dalších zkušebních místech se tento postup opakoval. Postup zkoušení je patrný z následujícího Obr. 112.



Obr. 112 Grafické znázornění postupu měření FAST-S-11-22 [VZ]

Zkušební betonové dlaždice byly vždy označovány jednotným způsobem. Označení D5/M2/3 znamená, že je jednalo o dlaždici č. 5, která byla vyrobena ve druhé míchačce M2 a poslední číslo 3 označuje místo měření.

Měsíční i roční měření byla prováděna na vzorcích z bedněné strany.

### 5.5.5.3 Výsledky měření tabelárně a graficky zaznamenané

Naměřená data i grafické zobrazení jsou uvedeny v Příloze 5 a z důvodu velkého množství dat jsou v následujících tabulkách uvedeny pouze vypočtené hodnoty součinitele  $k_1$ , resp.  $ISA$ . Vzhledem k tomu, že v následující kapitole se dále s grafy pracuje, jsou uvedeny pouze v příloze. Příloha 5 obsahuje:

#### ISAT – 1 měsíc:

- Výsledky měření ve stáří 1 měsíc (Tabulka O), kde je uvedeno 39 hodnot povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  (i s přepočtem na srovnávací 3% vlhkost), hodnot  $ISA_{10\ min}$  a  $ISA_{30\ min}$ , i s kategorizací.
- Z naměřených hodnot byly vytvořeny tyto závislosti:
  - součinitele  $k_T$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek K)
  - hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek L)
  - hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek M)
  - hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek N)
  - hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek O)

#### GWT – 1 měsíc:

- Výsledky měření s přístrojem GWT (Tabulka P), kdy je uvedeno 70 naměřených hodnot povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  (i s přepočtem na srovnávací 3% vlhkost) a součinitele vnitřní propustnosti  $k_1$ , i s kategorizací ve stáří 30 dní.
- Z naměřených hodnot byly vytvořeny tyto závislosti:
  - součinitele  $k_1$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek P)
  - součinitele  $k_1$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc (Obrázek Q)

#### ISAT – 1 měsíc:

- Výsledky měření ve stáří 1 rok (Tabulka Q), kde je uvedeno 97 hodnot povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  (i s přepočtem na srovnávací 3% vlhkost), hodnot  $ISA_{10\ min}$  a  $ISA_{30\ min}$ , i s kategorizací.
- Z naměřených hodnot byly vytvořeny tyto závislosti:
  - součinitele  $k_T$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok (Obrázek R)
  - hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok (Obrázek S)

- hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok (Obrázek T)
- hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 rok (Obrázek U)
- hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 rok (Obrázek V)

#### GWT – 1 rok:

Naměřená data s metodou GWT ve stáří 1 měsíc neprokázala silnou závislost na  $w$ ,  $k_T$ ,  $ISA_{10\ min}$  ani  $ISA_{30\ min}$ , proto nebyla prováděna měření ve stáří 1 rok.

## 5.6 ETAPA 6 – ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Následující kapitola stručně hodnotí naměřené data a formuluje získané závěry.

### 5.6.1 Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.

- a) Provzdušněný beton třídy C35/45 XF4 s 2 % a 10 % obsahem vzduchu

→ **Měření počáteční povrchové absorpce na trámcích** (stáří 3 až 8 týdnů)

Pórovitější beton (tj. 10 % vzduchu) vykazoval vyšší počáteční absorpci vody než beton s 2 % obsahem vzduchu.

Vyšší absorpce byla sledována na betonech plně vysušených při 110 °C po dobu 2 dnů, kdy při průměrné povrchové hmotnostní vlhkosti  $w = 0,11$  % dosahovaly hodnot vysoké absorpce betonu.

Výjimkou bylo měření na trámcích 6-10 %, kde bylo měření provedeno na bedněné hraně a výsledky jsou výrazně lepší, než na straně nebedněné. Kvalita povrchové vrstvy betonu (uhlazenost) má významný vliv na hodnoty počáteční povrchové absorpce.

Hodnota  $ISA_{30\ min}$  byla o 29 % až 52 % nižší než hodnota  $ISA_{10\ min}$  a zajímavé je, že u provzdušněných betonů s 2% obsahem vzduchu dosahovaly nejvíce vysušené betony (110 °C, 72 hod) rozdílu hodnot kolem 30 % při zbytkové povrchové vlhkosti  $w = 0,11$  %.

→ **Měření vzduchové propustnosti na dlaždicích** (stáří 6 týdnů)

Hodnoty součinitele vzduchové propustnosti při 3% vlhkosti  $k_{T,3}$  u provzdušněných betonů s 10% obsahem vzduchu jsou vyšší (odpovídají třídě trvanlivosti dle Torrenta „střední“) než u betonů s 2% obsahem vzduchu (odpovídají třídě trvanlivosti dle Torrenta „dobrá“). Je tedy zřejmé, že obsah vzduchu ovlivňuje kvalitu povrchové vrstvy betonu.

Vliv vyšší provzdušněnosti betonu se jednoznačně projevil vyšší propustností při srovnatelné povrchové vlhkosti.

- b) Neprovzdušněný beton třídy C35/45 (stáří 0,5 roku a 2,5 roku)

→ **Měření vzduchové propustnosti, vodní propustnosti a počáteční povrchové absorpce na dlaždicích**

Betonové dlaždice ve stáří 6 měsíců vykazovaly horší výsledky měření vzduchové propustnosti než ty samé vzorky ve stáří 2,5 roku. Hodnoty součinitele propustnosti  $k_{T,3}$  ve stáří 6 měsíců se pohybovaly ve třídě „střední“ až „špatná“, kdežto ve stáří 2,5 roku již byly hodnoty jednoznačně ve třídě trvanlivosti dle Torrenta „střední“ při srovnávací 3% povrchové hmotnostní vlhkosti. Je zde patrný vliv vysychání, neboť povrchová hmotnostní vlhkost  $w$  u 2,5 roku starých betonů dosahuje hodnot kolem 1,2 %, kdežto u 0,5 roku je  $w$  průměrně 4,2 %. U těchto vzorků se projevil pozitivní vliv stáří na snížení propustnosti betonu při srovnatelné povrchové vlhkosti.

Naměřené hodnoty povrchové počáteční absorpce po 10 min  $ISA_{10 \text{ min}}$  dosahovaly průměrných hodnot 0,11 ml/m<sup>2</sup>/s, což spadá do kategorie nízké absorpce.

Přístrojem GWT byl změřen součinitel vnitřní propustnosti  $k_1$  s průměrnou hodnotou 11,5 \*10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>. Neplatná norma DIN 1045 považuje za trvanlivé betony ty, jejichž součinitel propustnosti  $k_1 < 1,0 \cdot 10^{-16}$  m<sup>2</sup>. Naměřená průměrná hodnota vnitřní propustnosti  $k_1$  je 10krát horší a naměřené výsledky dosahují velkého rozptylu jednoho řádu.

### **5.6.2 Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech**

#### **→ Vliv omezené hydratace na tvorbu pórové struktury**

Předpoklad, že se po vysušení vzorků v důsledku nedostatku vody v betonu zastaví proces hydratace a tím i tvorba pórové struktury v povrchové vrstvě, nebyl zcela přesný. V krátkých časových zkušebních intervalech (2, 3 a 7 dní) nedošlo k úplnému zastavení hydratace a tím došlo k ovlivnění výsledků. Důvodem byla zejména četnost a časová náročnost vybraných zkoušek. Přesto výsledky u všech zkoušek naznačují trend odpovídající předpokladům.

Výsledky zkoušek propustností pro vzduch a vodu prokázaly, že dostatek vody pro hydrataci je rozhodující především v počátečním stadiu hydratace, tj. v prvních 14 dnech zrání. Hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_{T,3}$  se pohybovaly v třídě trvanlivosti dle Torrenta „střední“ až „dobrá“ a se zvyšujícím se stářím snižoval. Bylo prokázáno, že vyzrálé betony mají kvalitnější povrchovou vrstvu oproti betonům „mladým“. Stejně zjištění bylo také prokázáno u měření součinitele vnitřní propustnosti  $k_1$  a počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$ ,  $ISA_{30 \text{ min}}$  i  $ISA_{60 \text{ min}}$ , kde byly nejmladší betony hodnoceny absorbcí „vysokou“ a nejstarší betony absorbcí „nízkou“.

Z výsledků všech tří zkoušek propustností lze také usuzovat, že při tuhnutí a tvrdnutí betonu pravděpodobně dochází k tvorbě odlišných pórových struktur s póry různých velikostí. Značnou roli při stanovení propustnosti hraje aktuální obsah vody v pórech povrchové vrstvy zkoušeného betonu. Čím více vody se vypaří, tím vyšší hodnoty propustnosti se naměří.

### 5.6.3 Experimentální měření v projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny

#### → Měření na dlaždicích

Měření propustnosti povrchové vrstvy betonových dlaždic metodami TPT, GWT a ISAT jsou prováděna za účelem vytvoření přepočtových vztahů mezi povrchovou vlhkostí a jednotlivými metodami, a dále jako srovnávací měření metod mezi sebou. I když se měření prováděla na stejných betonech při různých vlhkostech, malý počet měření nepostačuje pro vytvoření přepočtových vztahů, ale výsledky těchto měření se stanou podkladem budoucích korelačních závislostí a také mohou sloužit jako podklad pro vytvoření „Standardního operačního postupu pro přepočet hodnoty součinitele vodní propustnosti vzhledem k aktuální vlhkosti“ i pro metody GWT a ISAT.

GWT: Zkoušky vzduchové propustnosti povrchové vrstvy betonu prokázaly, že betonové dlaždice první sady mají kvalitu krycí vrstvy dle Torrenta „dobrou“, druhé a třetí sady „střední“ krycí vrstvu betonu. Hodnoty součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  byly podle již dříve vyvinutých korelačních vztahů přepočteny na tzv. 3% vlhkost, a proto mohlo být provedeno vzájemné porovnání. U metody GWT takováto korelace stále neexistuje, ale výsledky zkoušek prováděných na těchto dlaždicích se stanou podkladem pro vytvoření přepočtových vztahů. U námi naměřených dat je absence výsledků pro povrchovou vlhkost 1,5 % až 2,5 %, a proto nelze jednoznačně stanovit závislost povrchové vlhkosti na počáteční povrchové propustnosti  $k_1$ . Je třeba zvýšit počet měření a doplnit je alespoň o měření při povrchové vlhkosti 1,5 ~ 2,5 %.

ISAT: Koeficient vzduchové propustnosti dosahoval hodnot koeficientu vzduchové propustnosti při srovnávací 3% vlhkosti  $k_{T,3}$  „dobrá“, výjimečně „střední“. U měření počáteční povrchové absorpce byly naměřeny hodnoty absorpce „nízká“ téměř u všech hodnot  $ISA_{10 \text{ min}}$ ,  $ISA_{30 \text{ min}}$  i  $ISA_{60 \text{ min}}$ . Je zde patrná absence měření při povrchové vlhkosti 1,4 ~ 2,0 %, a proto nelze jednoznačně stanovit závislost povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  na počáteční povrchové propustnosti  $ISA$  a je třeba zvýšit počet měření zejména při povrchové hmotnostní vlhkosti 1,4 ~ 2,0 %.

#### → Měření na krychlích

Přidání vláken má pozitivní vliv na hodnotu součinitele vzduchové propustnosti  $k_{T,3}$  při srovnávací 3% vlhkosti. Výrazně nejlepších vlastností bylo dosaženo přidáním vláken Stavon, kdy při různém poměru v/c bylo dosaženo téměř shodných výsledků vzduchové propustnosti a krycí vrstva betonu odpovídá třídě trvanlivosti dle Torrenta „dobrá“. Přidáním vláken Econo-Net nebylo zlepšení vlastností tak markantní jako u vláken Stavon a kvalita krycí vrstvy betonu byla hodnocena převážně jako „střední“. Rozdíl výsledků je způsoben



zejména funkcí vláken, kdy vlákna Econo-Net jsou určena pro zlepšení mechanických vlastností, zejména zvýšení houževnatosti a tahové pevnosti kdežto vlákna Stavon mají protismršťující účinky.

#### **5.6.4 Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti**

V rámci měření počáteční povrchové absorpce byl vytvořen velký konzistentní soubor dat, kdy bylo naměřeno 110 hodnot  $ISA_{10\ min}$  a  $ISA_{30\ min}$  při aktuální povrchové vlhkosti ve stáří 2 roky. Naměřená data postačují k vytvoření přepočtových vztahů na srovnávací 3% vlhkost.

Dále byl zhodnocen stav normalizace pro stanovení počáteční povrchové absorpce, což slouží jako podklad pro tvorbu metodiky měření přístrojem ISAT.

#### **5.6.5 Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu**

Při měření počáteční povrchové absorpce byl vytvořen konzistentní soubor dat, kdy ve stáří 1 měsíc bylo naměřeno 39 hodnot  $ISA_{10\ min}$  i  $ISA_{30\ min}$ , a 70 hodnot  $k_1$  při aktuální povrchové vlhkosti na bedněných plochách. Ve stáří 1 rok bylo naměřeno 97 hodnot  $ISA_{10\ min}$  a  $ISA_{30\ min}$  při aktuální povrchové vlhkosti na bedněných plochách. Naměřená data postačují k vytvoření přepočtových vztahů na srovnávací 3% vlhkost.

### **5.7 ETAPA 7 – VYTVOŘENÍ PŘEPOČTOVÝCH VZTAHŮ A ZÁVĚREČNÁ ANALÝZA DAT**

Nejdůležitější etapou celé disertační práce bylo vytvoření přepočtových vztahů na srovnávací 3% povrchovou hmotnostní vlhkost. Z výše uvedených naměřených dat byly vybrány výsledky měření  $w$ ,  $ISA_{10\ min}$ ,  $ISA_{30\ min}$  a  $k_T$  z výzkumů FAST-J-11-12 (ve stáří 2 roky) a FAST-S-11-22 (ve stáří 1 měsíc a 1 rok). Důvodem výběru právě těchto dat byla skutečnost, že soubory naměřených dat vykazovaly konzistentní výsledky s kladným předpokladem pro vytvoření výpočtových vztahů. Předpoklad byl správný a vzniklo několik nových přepočtových vztahů:

- A) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10\ min}$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc, 1 rok, 2 roky a bez ohledu na stáří.
- B) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{30\ min}$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc, 1 rok, 2 roky a bez ohledu na stáří.

- C) Závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc.
- D) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 1 měsíc.
- E) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{30 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 1 měsíc.

Měření součinitele vnitřní propustnosti  $k_i$  metodou GWT nepřinesla očekávané výsledky a vzhledem k vysokým nejistotám výsledky neumožňují vytvořit přepočtové vztahy na srovnávací 3% vlhkost ani jiné porovnání. Jedná se o potvrzení názoru, že přístroj GWT nedosahuje dostatečné přesnosti měření a není jej tedy vhodné pro hodnocení trvanlivosti využívat.

Při vytvoření přepočtových vztahů se postupovalo v souladu s [42]. Referenční vlhkost 3% byla vybrána s ohledem na stav vlhkosti v praxi nejčastěji se vyskytujících betonů. Základní konverzní vztah byl stanoven následovně:

$$a = \frac{\ln k_{T,w} - \ln k_{T,3}}{w - 3}, \text{ kde} \quad (27)$$

$k_{T,w}$ ... součinitel vzduchové propustnosti [ $\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ] při aktuální povrchové vlhkosti  $w$ ,

$k_{T,3}$ ... součinitel vzduchové propustnosti [ $\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ] při povrchové vlhkosti  $w = 3 \%$ ,

$w$ ... povrchová hmotnostní vlhkost [%],

$a$ ...opravný vlhkostní koeficient, neboli regresní koeficient lineární funkce  $\ln k_T = a \cdot w + b$ , který určuje sklon lineární závislosti (přímky). Koeficient  $a$  je závislý na složení a struktuře betonu,

$b$ ...koeficient, který určuje posun přímky (průsečík s osou  $y$ ) a je ovlivněn zejména složením betonu.

Z výše uvedené rovnice (26) byl vyjádřen součinitel vzduchové propustnosti při 3% vlhkosti:

$$\ln k_{T,3} = a(3 - w) + \ln k_{T,w}, \quad (28)$$

a jednoduchou úpravou z toho plyne exponenciální rovnice ve tvaru

$$k_{T,3} = k_{T,w} \cdot e^{a(3-w)}, \quad (29)$$

kteřá se používá pro stanovení hodnoty součinitele vzduchové propustnosti při srovnávací 3% vlhkosti.

Stejným způsobem bylo postupováno i pro stanovení následujících přepočtových vztahů u metody ISAT a byly stanoveny hodnoty korelačního koeficientu vlhkosti i pro naměřená data.

Regresní modely metodou nejmenších čtverců byly vytvořeny v programu MATLAB a také byla vypočítána spolehlivost regresního modelu. Vyčísleny jsou odchylky součet nejmenších čtverců a střední kvadratická chyba. Nechybí ani koeficient determinace, který vyjadřuje, kolik procent z celkové variability je vysvětleno regresní přímkou.

Dále byl vytvořen jednotný přepočtový vztah, který využívá koeficientu  $a$  a 95% intervalového odhadu. Koeficient  $a$  je proměnný pro jednotlivé stáří.

**ad A) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc, 1 rok, 2 roky a bez ohledu na stáří.**

Pro stanovení závislosti  $w$  na  $ISA_{10 \text{ min}}$  byl vytvořen níže uvedený regresní model a přepočtový vztah, jejichž parametry jsou uvedeny u konkrétních stárí.

**Regresní model:** 
$$f(x) = a \cdot e^{bx} \quad (30)$$

**Přepočtový vztah:** 
$$ISA_{(10 \text{ min})_3} = ISA_{(10 \text{ min})_w} \cdot e^{a(3-w)}, \text{ kde} \quad (31)$$

$ISA_{(10 \text{ min})_3}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při srovnávací povrchové vlhkosti  $w = 3 \text{ \%}$  [ $\text{ml/m}^2/\text{s}$ ],

$ISA_{(10 \text{ min})_w}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při aktuální povrchové vlhkosti  $w$  [ $\text{ml/m}^2/\text{s}$ ],

$a$ ... opravný vlhkostní koeficient, neboli regresní koeficient, který určuje sklon lineární závislosti (přímky) a je závislý na složení i struktuře betonu [-],

$w$ ... aktuální povrchová vlhkost [%].

Následují výsledky regresních modelů pro jednotlivá stáří.

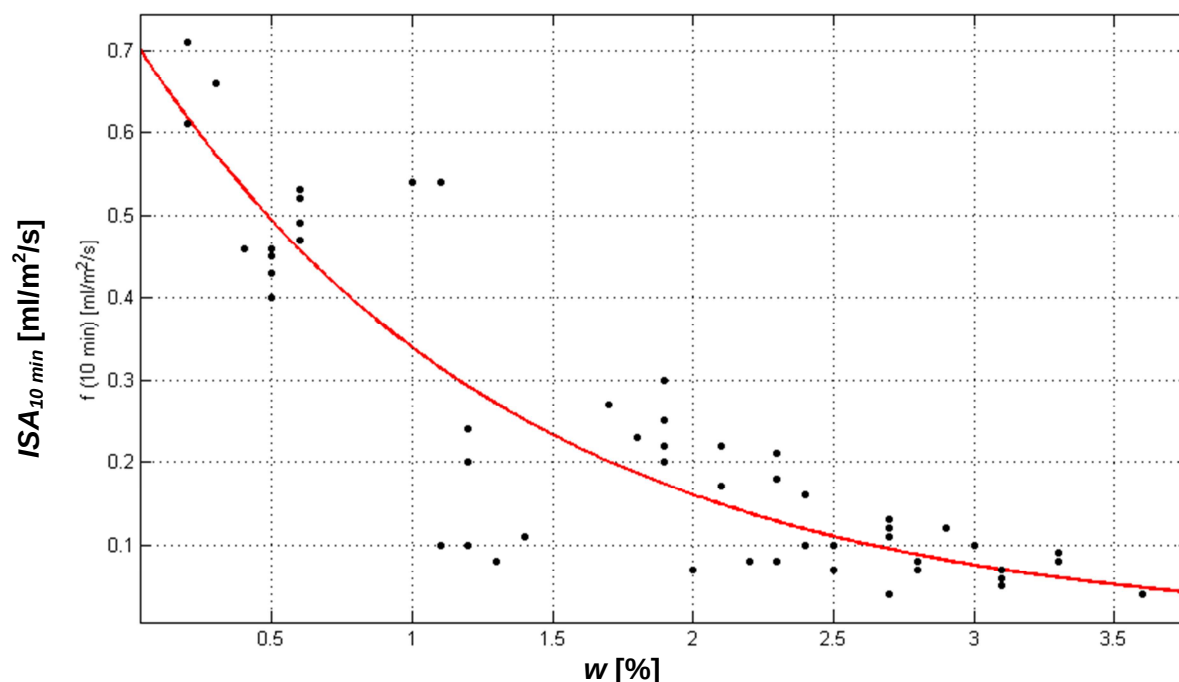
- **$ISA_{10 \text{ min}} - w$  (stáří 1 měsíc)**

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený a neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 34 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{10 \text{ min}} - w$  (stáří 1 měsíc)

|                                                   |         |                                                                                  |        |
|---------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,1749 \text{ (0,1458; 0,204)}$<br>$b = -0,7474 \text{ (-0,8757; -0,6191)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                                  |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,3639  | Koeficient determinace $R^2$ :                                                   | 0,8042 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,08365 | Upravený $R^2$ :                                                                 | 0,8005 |

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{10\ min}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 113 Závislost hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc

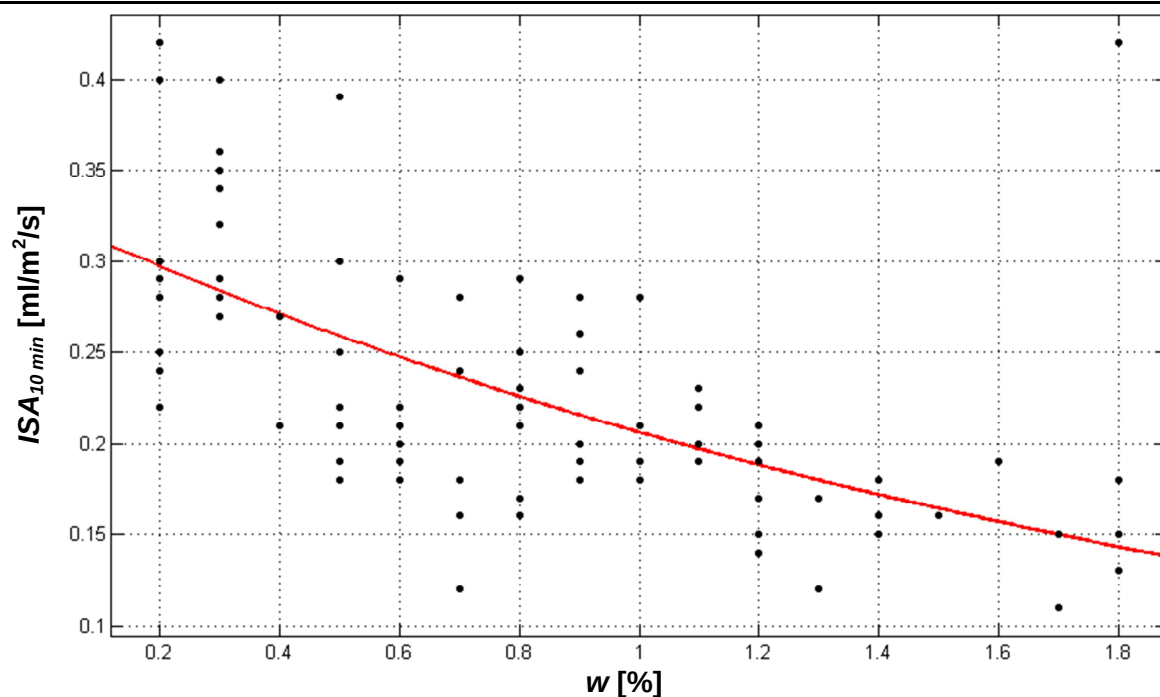
- **$ISA_{10\ min} - w$  (stáří 1 rok)**

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený a neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 35 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{10\ min} - w$  (stáří 1 rok)

|                                                   |         |                                                                                   |        |
|---------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,3254 \text{ (0,2952; 0,3557)}$<br>$b = -0,4568 \text{ (-0,5811; -0,3324)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                                   |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,2914  | Koeficient determinace $R^2$ :                                                    | 0,3679 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,05538 | Upravený $R^2$ :                                                                  | 0,3612 |

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{10\ min}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 114 Závislost hodnoty  $ISA_{10\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok

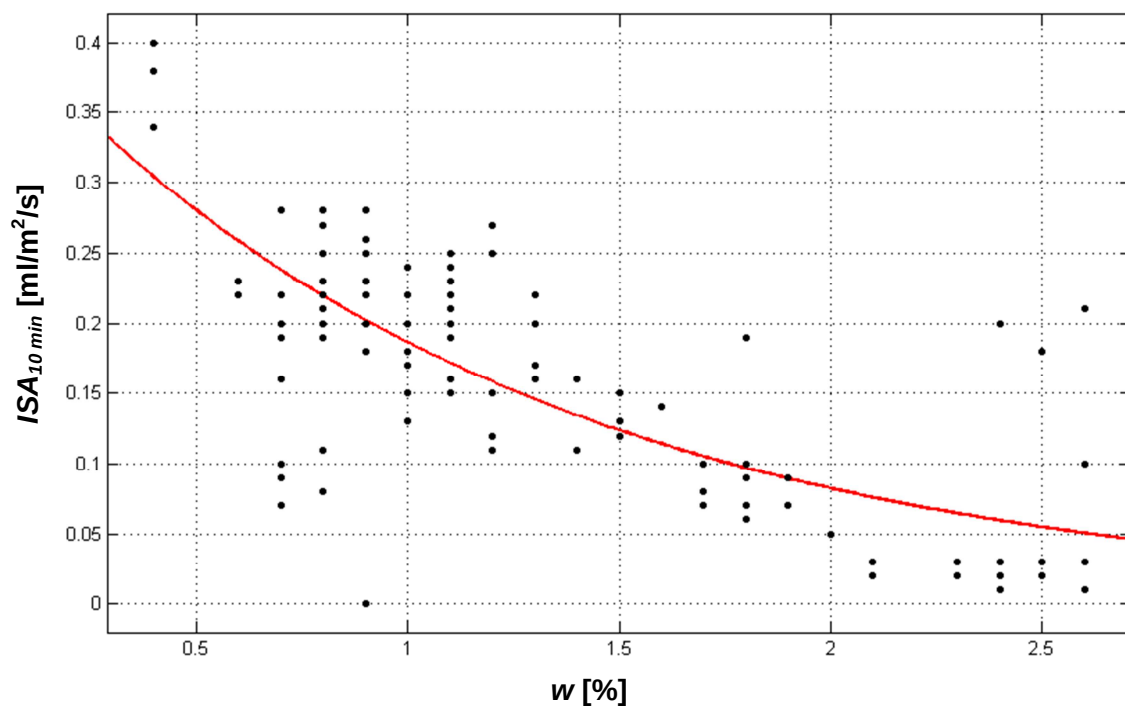
- **$ISA_{10\ min} - w$  (stáří 2 roky)**

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený a neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 36 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{10\ min} - w$  (stáří 2 roky)

|                                                   |         |                                                                 |        |
|---------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,422$ (0,3499; 0,4941)<br>$b = -0,817$ (-0,9885; -0,6456) |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                 |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,3789  | Koeficient determinace $R^2$ :                                  | 0,5771 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,05951 | Upravený $R^2$ :                                                | 0,5732 |

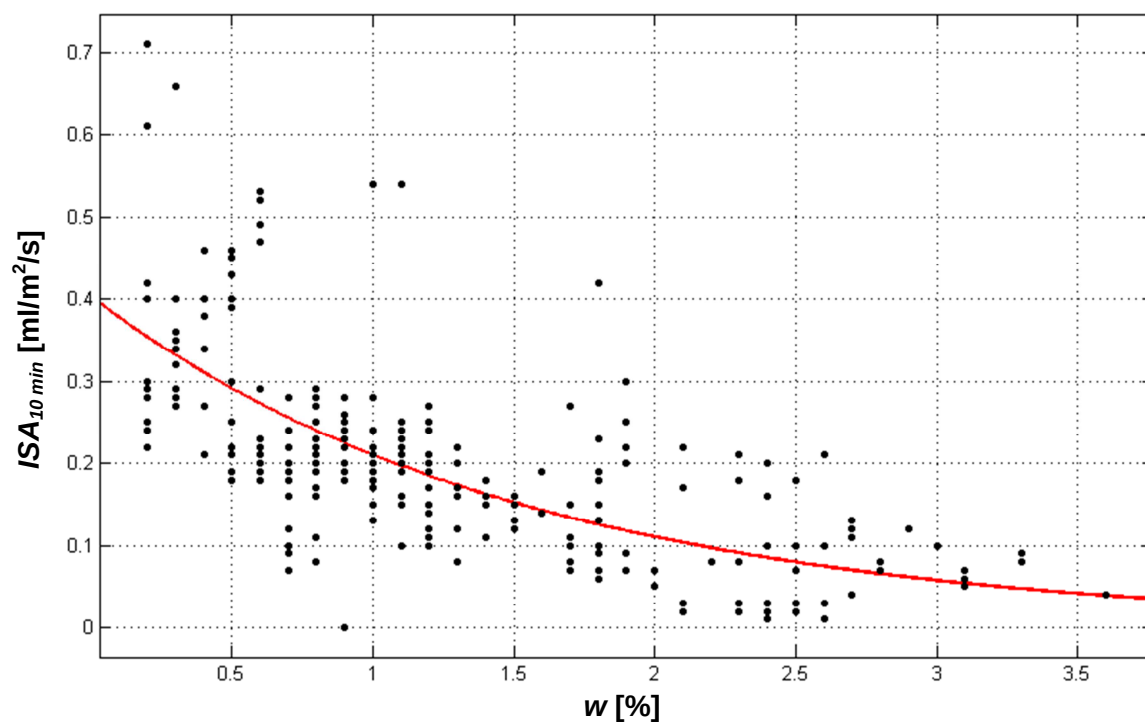
Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{10\ min}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 115 Závislost hodnoty  $ISA_{10 min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 2 roky

- **$ISA_{10 min} - w$  (bez ohledu na stáří)**

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{10 min}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 116 Závislost hodnoty  $ISA_{10 min}$  na vlhkosti  $w$ ; bez ohledu na stáří

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 37 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{10 \text{ min}} - w$  (bez ohledu na stáří)

|                                                   |         |                                                                                  |        |
|---------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,4027 \text{ (0,3665; 0,439)}$<br>$b = -0,6484 \text{ (-0,7496; -0,5472)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                                  |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 1,862   | Koeficient determinace $R^2$ :                                                   | 0,4763 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,08495 | Upravený $R^2$ :                                                                 | 0,4743 |

**ad B) Závislost povrchové počáteční absorpci  $ISA_{30 \text{ min}}$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc, 1 rok, 2 roky a bez ohledu na stáří.**

Pro stanovení závislosti hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  na  $w$  byl vytvořen regresní model a přepočtový vztah, jejichž parametry jsou uvedeny u konkrétních stárí.

**Regresní model:** 
$$f(x) = a \cdot e^{bx} \quad (32)$$

**Přepočtový vztah:** 
$$ISA_{(30 \text{ min})_3} = ISA_{(30 \text{ min})_w} \cdot e^{a(3-w)} \quad (33)$$

$ISA_{(30 \text{ min})_3}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při srovnávací povrchové vlhkosti  $w = 3 \text{ \% [ml/m}^2\text{/s]}$ ,

$ISA_{(30 \text{ min})_w}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při aktuální povrchové vlhkosti  $w \text{ [ml/m}^2\text{/s]}$ ,

$a$ ... opravný vlhkostní koeficient, neboli regresní koeficient, který určuje sklon lineární závislosti (přímky) a je závislý na složení i struktuře betonu [-],

$w$ ... aktuální povrchová vlhkost [%].

Následují výsledky regresních modelů pro jednotlivé stáří.

- **$ISA_{30 \text{ min}} - w$  (stáří 1 měsíc)**

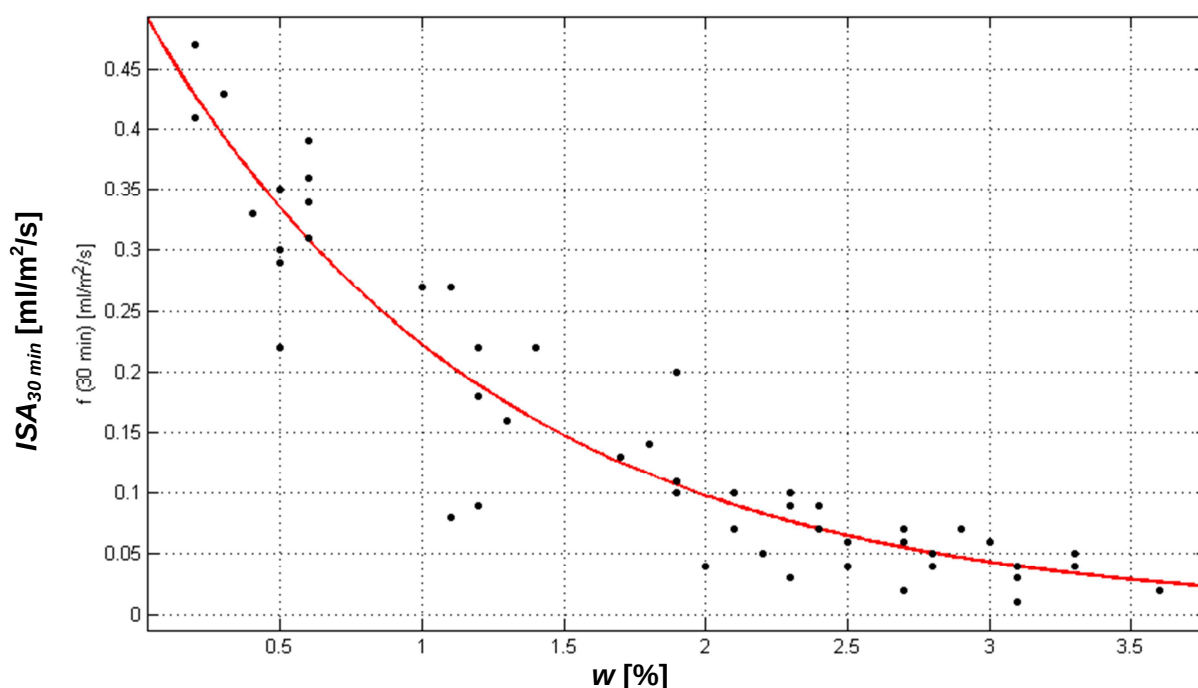
Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .



Tab. 38 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{30 \text{ min}} - w$  (stáří 1 měsíc)

|                                                   |         |                                                                                  |        |
|---------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,1078 \text{ (0,093; 0,1225)}$<br>$b = -0,8173 \text{ (-0,9209; -0,7136)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                                  |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,09081 | Koeficient determinace $R^2$ :                                                   | 0,8936 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,04279 | Upravený $R^2$ :                                                                 | 0,8915 |

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{30 \text{ min}}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.

Obr. 117 Závislost hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc

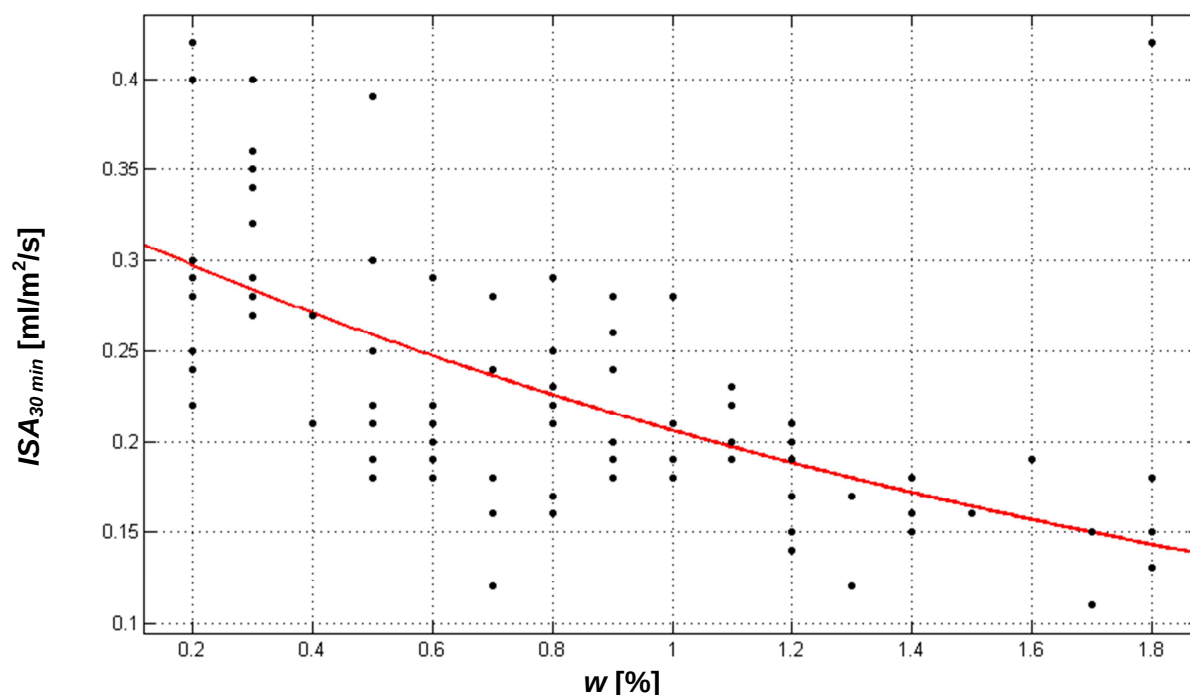
- **$ISA_{30 \text{ min}} - w$  (stáří 1 rok)**

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 39 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{30 \text{ min}} - w$  (stáří 1 rok)

|                                                   |         |                                                                                   |        |
|---------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,3254 \text{ (0,2952; 0,3557)}$<br>$b = -0,4568 \text{ (-0,5811; -0,3324)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                                   |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,02914 | Koeficient determinace $R^2$ :                                                    | 0,3679 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,05538 | Upravený $R^2$ :                                                                  | 0,3612 |

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{30\ min}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 118 Závislost hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok

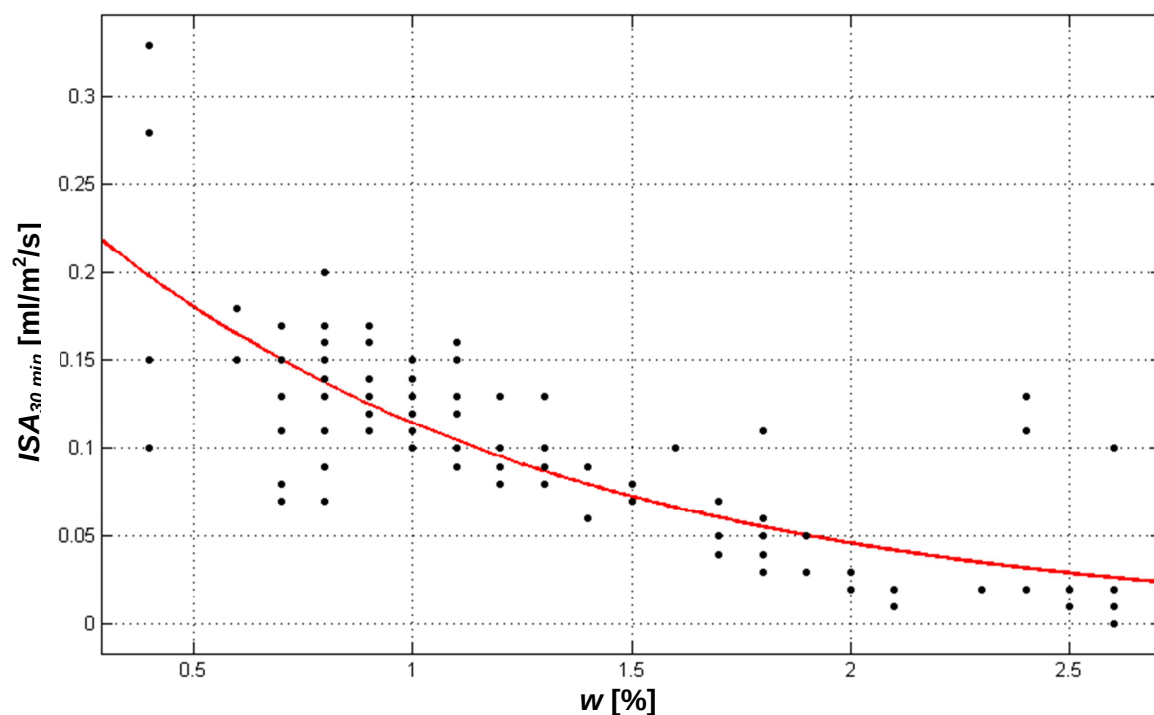
- **$ISA_{30\ min} - w$  (stáří 2 roky)**

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 40 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{30\ min} - w$  (stáří 2 roky)

|                                                   |         |                                                                                 |        |
|---------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |         | $a = 0,2851 \text{ (0,2386; 0,3316)}$<br>$b = -0,9108 \text{ (-1,08; -0,7417)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |         |                                                                                 |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,1269  | Koeficient determinace $R^2$ :                                                  | 0,6472 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,03444 | Upravený $R^2$ :                                                                | 0,6439 |

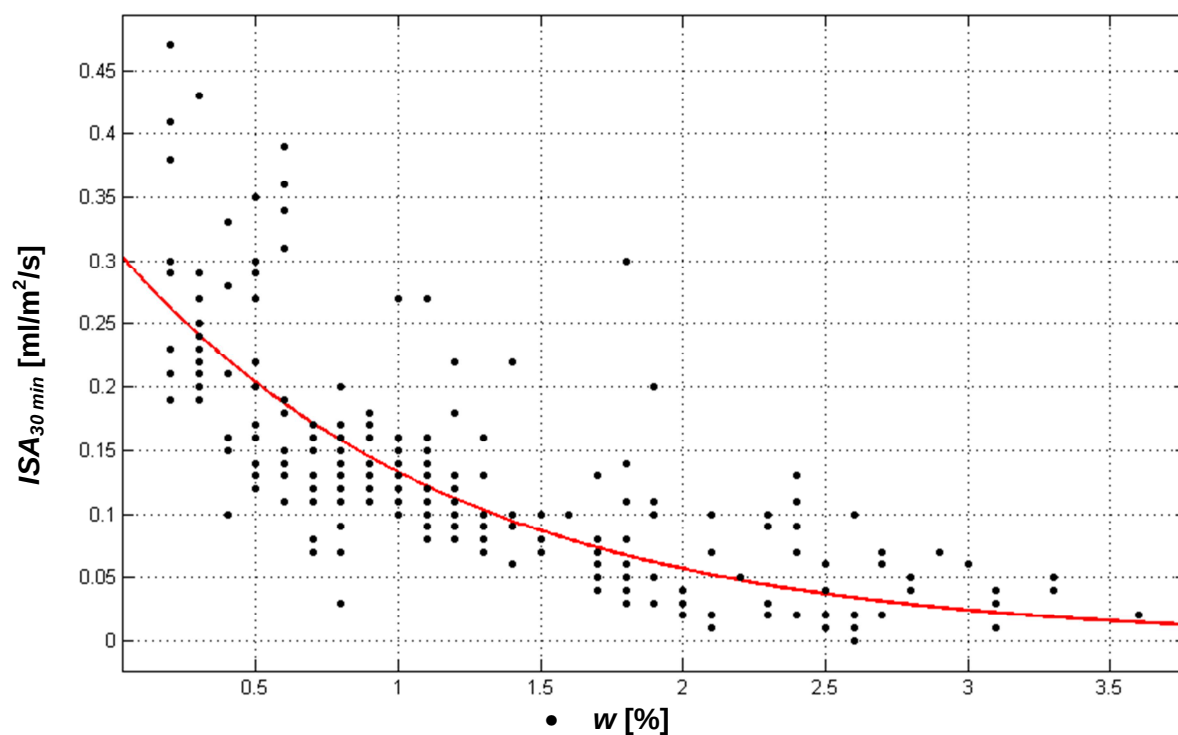
Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{30\ min}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 119 Závislost hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 2 roky

- **$ISA_{30 \text{ min}} - w$  (bez ohledu na stáří)**

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{30 \text{ min}}$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 120 Závislost hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; bez ohledu na stáří

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny: odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 41 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{30\ min} - w$  (bez ohledu na stáří)

|                                                   |        |                                                                                 |        |
|---------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |        | $a = 0,3111 \text{ (0,2842; 0,338)}$<br>$b = -0,8505 \text{ (-0,9599; -0,741)}$ |        |
| Věrohodnost modelu:                               |        |                                                                                 |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 0,7495 | Koeficient determinace $R^2$ :                                                  | 0,5838 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 0,0539 | Upravený $R^2$ :                                                                | 0,5822 |

### ad C) Závislost součinitele vzduchové propustnosti $k_T$ na povrchové hmotnostní vlhkosti $w$ ve stáří 1 měsíc

Tento přepočtení vztah již byl vytvořen [43] s následujícím přepočtovým vztahem:

$$k_{T,3} = k_{T,w} \cdot e^{\alpha(3-w)}, \text{ kde}$$

$k_{T,w}$ ... součinitel vzduchové propustnosti [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ] při aktuální povrchové vlhkosti  $w$ ,

$k_{T,3}$ ... součinitel vzduchové propustnosti [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ] při povrchové vlhkosti  $w = 3 \%$ ,

$w$ ... povrchová hmotnostní vlhkost [%],

$a$ ... opravný vlhkostní koeficient, neboli regresní koeficient [-].

V rámci vyhodnocení výsledků měření z výzkumu FAST-S-11-22 ve stáří 1 měsíc byly regresní model i přepočtový vztah převzaty z [43].

- $k_T - w$  (stáří 1 měsíc)

**Regresní model:**  $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$  (34)

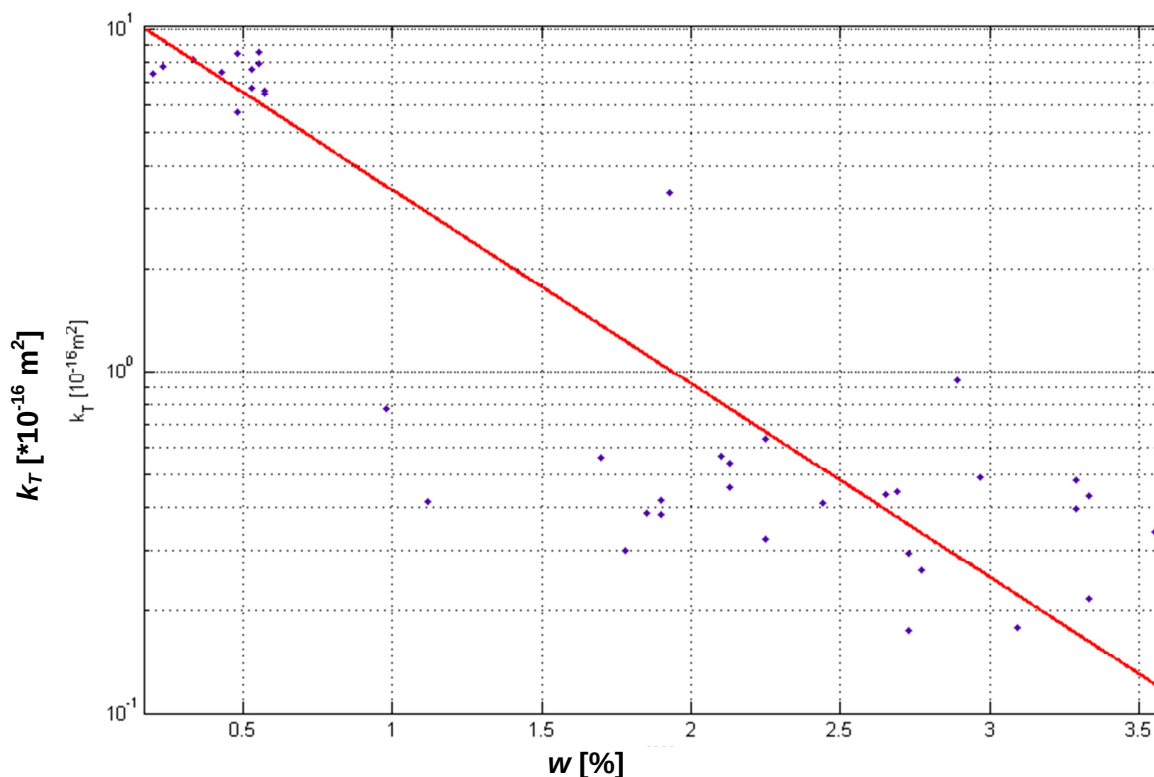
**Přepočtový vztah:**  $k_{T;3} = k_{T,w} \cdot e^{a(3-w)}$  (35)

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny: odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 42 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $k_T - w$  (stáří 1 měsíc)

|                                                   |       |                                                              |        |
|---------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Regresní koeficienty<br>95% intervalového odhadu: |       | $a = 12,51$ (10,34; 14,68)<br>$b = -1,307$ (-1,631; -0,9825) |        |
| Věrohodnost modelu:                               |       |                                                              |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                      | 47,18 | Koeficient determinace $R^2$ :                               | 0,8855 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                   | 1,129 | Upravený $R^2$ :                                             | 0,8824 |

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $k_T$  na  $w$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot. Logaritmická stupnice se exponenciálním procesem transformovala do přímky.



Obr. 121 Závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc

**ad D) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$  na ve stáří 1 měsíc.**

Jedinou závislost, kterou bylo možné vytvořit ve vztahu metod TPT a ISAT, bylo z výsledků ve stáří 1 měsíc. Níže je uveden regresní model i přepočtový vztah.

- **$ISA_{10 \text{ min}} - k_T$  (stáří 1 měsíc)**

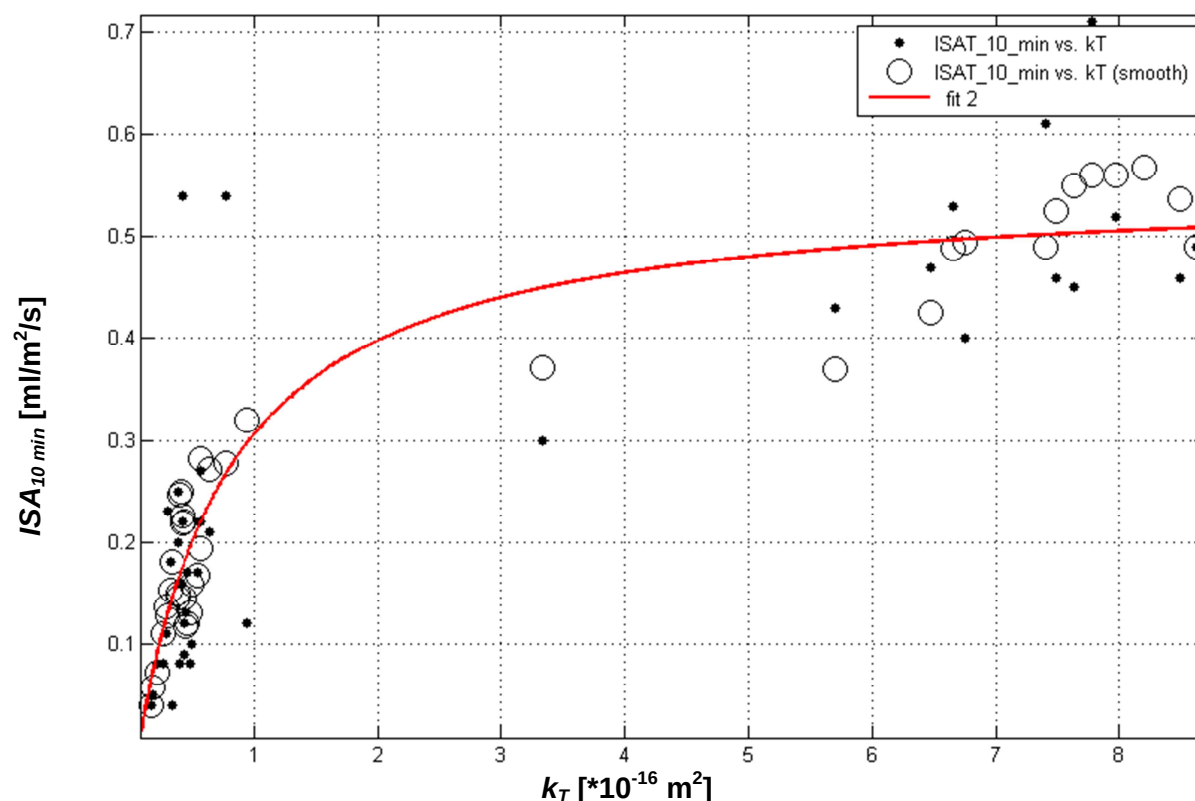
**Regresní model:**  $f(x) = (p_1 \cdot x + p_2) / (x + q_1)$  (36)

**Přepočtový vztah:**  $ISA_{10 \text{ min}} = \frac{p_1 k_T + p_2}{k_T + q_1}$ , kde (37)

$k_T$ ... součinitel vzduchové propustnosti [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ] při aktuální povrchové vlhkosti  $w$ ,  
 $ISA_{10 \text{ min}}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při aktuální povrchové vlhkosti  $w$   
 $[\text{ml/m}^2/\text{s}]$ ,

$p_1, p_2, q_1$ ... opravné koeficienty určující sklon lineární závislosti (přímky) a jsou ovlivněné složením i strukturou betonu [-].

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{30 \text{ min}}$  na  $k_T$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot. Hodnoty byly vyhlazeny klouzavý průměrem (označeno kolečkem).



Obr. 122 Závislost hodnoty  $ISA_{10 \text{ min}}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 43 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{10 \text{ min}} - k_T$  (stáří 1 měsíc)

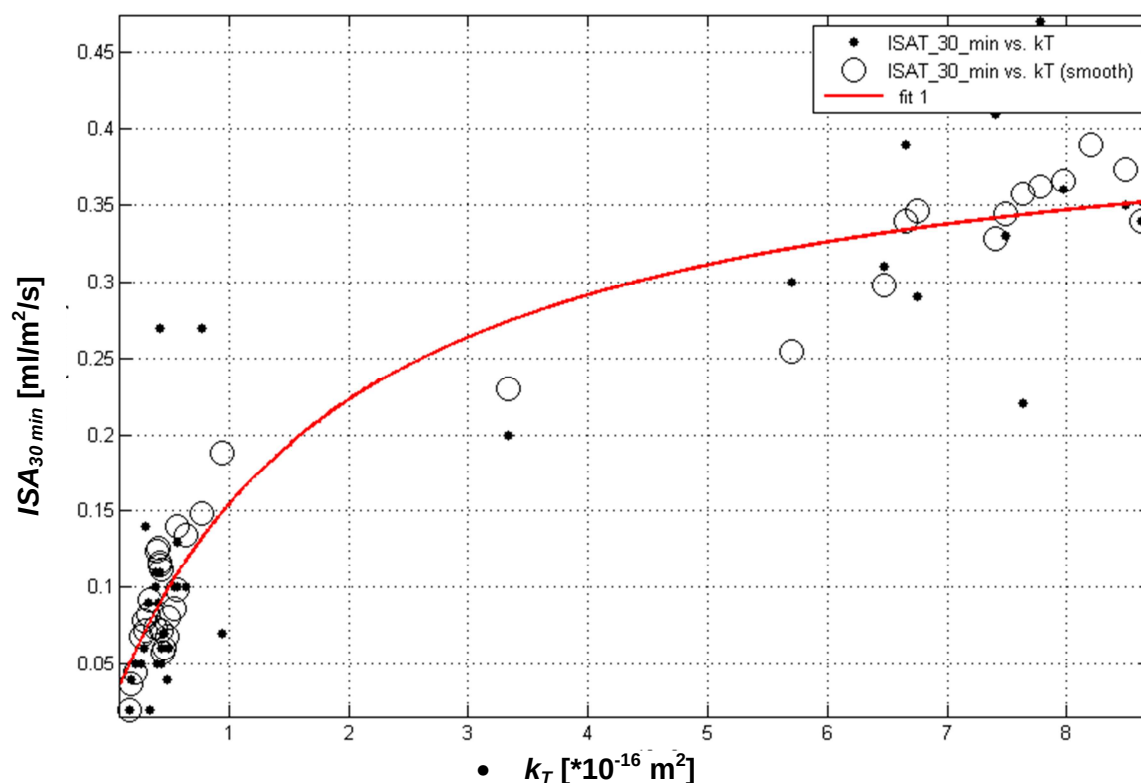
|                                                           |         |                                                                                                         |        |
|-----------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Regresní koeficienty<br/>95% intervalového odhadu:</b> |         | $p_1 = 0,5539$ (0,5096; 0,5982)<br>$p_2 = -0,03798$ (-0,1049; 0,02894)<br>$q_1 = 0,6869$ (0,2137; 1,16) |        |
| <b>Věrohodnost modelu:</b>                                |         |                                                                                                         |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                              | 0,08436 | Koeficient determinace $R^2$ :                                                                          | 0,9219 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                           | 0,04841 | Upravený $R^2$ :                                                                                        | 0,9176 |

ad E) Závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{30 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 1 měsíc.

Regresní model i přepočtový vztah pro  $ISA_{30\ min}$  je totožný s  $ISA_{10\ min}$ , pouze se liší níže uvedené regresní koeficienty 95 % intervalového odhadu a věrohodnost modelu.

- **$ISA_{30\ min} - k_T$  (stáří 1 měsíc)**

Následující obrázek graficky zobrazuje průběh závislosti  $ISA_{30\ min}$  na  $k_T$  a je zde patrný rozptyl naměřených hodnot. Hodnoty byly vyhlazeny klouzavý průměrem (označeno kolečkem).



Obr. 123 Závislost hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu a jsou uvedeny: odchylky součet nejmenších čtverců SSE, střední kvadratická chyba RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace  $R^2$ .

Tab. 44 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu  $ISA_{30\ min} - k_T$  (stáří 1 měsíc)

|                                                           |         |                                                                                                       |        |
|-----------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Regresní koeficienty<br/>95% intervalového odhadu:</b> |         | $p_1 = 0,4306$ (0,3682; 0,493)<br>$p_2 = 0,03893$ (-0,07125; 0,1491)<br>$q_1 = 2,042$ (0,5376; 3,546) |        |
| <b>Věrohodnost modelu:</b>                                |         |                                                                                                       |        |
| Součet čtvercových chyb SSE:                              | 0,02541 | Koeficient determinace $R^2$ :                                                                        | 0,9554 |
| Střední kvadratická chyba RMSE:                           | 0,02657 | Upravený $R^2$ :                                                                                      | 0,9529 |



**Závěrečná analýza dat**

Z výše uvedeného vyplývá, že bylo vytvořeno 10 nových přepočtových vztahů, a to konkrétně čtyři pro přepočet hodnoty  $ISA_{10 \text{ min}}$  na srovnávací 3% povrchovou vlhkost  $w$  pro jednotlivá stáří (1 měsíc, 1 rok, 2 roky, bez rozlišení stáří), čtyři pro hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  (dtto  $ISA_{10 \text{ min}}$ ) a dva vztahy pro přepočet součinitele  $k_T$  na hodnoty  $ISA_{10 \text{ min}}$ , resp.  $ISA_{30 \text{ min}}$  ve stáří 1 měsíc.

Přepočtové vztahy slouží jako cenný podklad pro hodnocení aktuální trvanlivosti betonu. Při jejich použití je ale důležité zvážit složení, stáří a ošetřování betonu s ohledem na spolehlivost přepočtových hodnot. Následující tabulky uvádí souhrn nejdůležitějších výsledků.

Tab. 45 Přepočtové vztahy  $ISA - w$ 

| <b>Stáří</b><br>(v rámci<br>výzkumu)                             | <b><math>ISA_{10 \text{ min}} - w</math></b>                           |                      | <b><math>ISA_{30 \text{ min}} - w</math></b>                           |                      |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|                                                                  | $ISA_{(10 \text{ min})_3} = ISA_{(10 \text{ min})_w} \cdot e^{a(3-w)}$ |                      | $ISA_{(30 \text{ min})_3} = ISA_{(30 \text{ min})_w} \cdot e^{a(3-w)}$ |                      |
|                                                                  | <b>a</b>                                                               | <b>R<sup>2</sup></b> | <b>a</b>                                                               | <b>R<sup>2</sup></b> |
| 1 měsíc<br>(FAST-J-10-96 a<br>FAST-S-11-22)                      | 0,1749                                                                 | 0,8042               | 0,1078                                                                 | 0,8936               |
| 1 rok<br>(FAST-S-11-22)                                          | 0,3254                                                                 | 0,3679               | 0,2759                                                                 | 0,5381               |
| 2 roky<br>(FAST-J-11-12)                                         | 0,4220                                                                 | 0,5771               | 0,2851                                                                 | 0,6472               |
| Nerozlišeno<br>(FAST-J-10-96,<br>FAST-J-11-12 a<br>FAST-S-11-22) | 0,4027                                                                 | 0,4763               | 0,3111                                                                 | 0,5838               |

Tab. 46 Přepočtové vztahy  $ISA - k_T$ 

| Stáří 1 měsíc<br>(FAST-S-11-22) | <b><math>ISA_{10 \text{ min}} - k_T</math></b>           | <b><math>ISA_{30 \text{ min}} - k_T</math></b>           |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Koeficient                      | $ISA_{10 \text{ min}} = \frac{p_1 k_T + p_2}{k_T + q_1}$ | $ISA_{30 \text{ min}} = \frac{p_1 k_T + p_2}{k_T + q_1}$ |
| $p_1$                           | 0,5539                                                   | 0,4306                                                   |
| $p_2$                           | -0,03798                                                 | 0,0389                                                   |
| $q_1$                           | 0,6869                                                   | 2,0420                                                   |

## 6 VZNIK METODIK

Cílem této práce bylo vytvořit jednotné metodiky pro přístroje GWT a ISAT s vazbou na metodu TPT při aktuální vlhkosti  $w$ . Při měření s přístrojem GWT nebyly zjištěny závislosti na  $w$ ,  $ISA_{10\ min}$ ,  $ISA_{30\ min}$  ani na  $k_T$ , neboť měření s tímto přístrojem vykazuje značné odchylky, a proto metodika vytvořena nebyla. Toto zjištění potvrzují i výsledky zahraničních výzkumů, kde jsou publikovány stejné závěry.

Při měření s přístrojem ISAT bylo zjištěno mnoho nových poznatků, které jsou souhrnně uvedeny v metodice s názvem „Metodika měření počáteční povrchové absorpce přístrojem ISAT“. Do metodiky byly také zakomponovány výsledky této disertační práce a je uvedena v Příloze 5. Jedná se o ucelený dokument pro komplexní hodnocení aktuální trvanlivosti betonu.

## 7 VĚDECKÝ PŘÍNOS

Propustností povrchové vrstvy betonu se zabývá mnoho vědeckých pracovišť po celém světě, neboť povrchová vrstva je nejslabším článkem celé betonové konstrukce a hlavní branou pro vnikání agresivních látek. Tato disertační práce navázala na problematiku celosvětově řešenou a rozšířila obzor problematiky propustnosti povrchové vrstvy. Vědeckým přínosem této práce jsou především:

- Rozsáhlá rešerše dostupných přístrojů pro měření propustnosti a sorptivity, které se používají pro hodnocení povrchové vrstvy betonu a poukazují na výslednou trvanlivost betonu. Jedná se o největší dostupnou knihovnu měřících přístrojů.
- Disertační práce navázala na závěry uvedené v GAČR č.103/05/2683 Analýzy možnosti ochrany ŽB konstrukcí snižováním propustnosti betonu (řešitel prof. Ing. Jiří Adámek, CSc.),
- Potvrzení již mnoho let známých závislostí a zákonitostí.
- Vytvoření přepočtových vztahů
  - A) závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10\ min}$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc, 1 rok, 2 roky a bez ohledu na stáří;
  - B) závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{30\ min}$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  ve stáří 1 měsíc, 1 rok, 2 roky a bez ohledu na stáří;
  - C) závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  na ve stáří 1 měsíc;
  - D) závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{10\ min}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 1 měsíc;
  - E) závislost povrchové počáteční absorpce  $ISA_{30\ min}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$  ve stáří 1 měsíc;které nejenže umožní přepočet aktuálního součinitele propustnosti, resp. počáteční povrchové absorpce, na hodnotu tzv. 3% vlhkosti a srovnatelnost výsledků mezi sebou, ale také umožní za použité přístroje TPT přibližně určit s danou odchylkou výsledek měření metodou ISAT.
- Vytvoření jednotné metodiky měření počáteční povrchové absorpce metodou ISAT.
- Potvrzení názoru, že přístroj GWT není přesným měřidlem a jeho výsledky nejsou srovnatelné mezi sebou ani při stejné vlhkosti a na stejných typech betonů.
- Potvrzení stanoviska, že metoda ISAT i přístroj TPT je vhodným srovnávacím prostředkem pro hodnocení aktuální trvanlivosti betonu.

## 8 ZÁVĚR

Disertační práce s názvem „Analýza výsledků měření propustnosti betonu pro vzduch a vodu jako podklad pro odhad jeho aktuální trvanlivosti“ se zabývá hodnocením betonového povrchu pomocí zkoušek propustnosti a absorpce. Jedná se o velmi aktuální téma, které řeší mnoho světových vědecko-výzkumných pracovišť. Na problematiku hodnocení trvanlivosti neexistuje jednotný názor, a proto je toto téma v ohnisku zájmu a zvyšuje se četnost výzkumných projektů.

Cílem této práce bylo vytvořit přepočtové vztahy mezi metodami pro hodnocení propustnosti povrchových vrstev betonu a umožnit tak orientační hodnocení povrchové vrstvy betonu v závislosti na aktuální vlhkosti. V praxi se nejčastěji vyskytují betony, jejichž povrchová hmotnostní vlhkost  $w$  je rovna 3 %, proto byla tato výše vlhkosti zvolena jako referenční. Pro srovnávání byly použity: přístroj TPT (Torrent Permeability Tester), přístroj GWT (Germanns Water Permeability Tester), metoda ISAT (Initial Surface Absorption Test) a digitální vlhkoměr KAKASO (PSMXi). Dílčím cílem bylo vytvořit jednotnou metodiku pro měření s přístrojem ISAT i GWT a stanovit tak jednotná kritéria při práci s přístroji.

Po několika prvotních výzkumech, jejichž výsledky nejsou (z důvodu velkého množství dat) součástí této práce, byla vytvořena jednotná metodika měření, podle které se v rámci celého výzkumu postupovalo. Na jednom měřicím místě byla vždy změřena povrchová hmotnostní vlhkost  $w$ , součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  a dále pak jeden z parametrů počáteční povrchové absorpce  $ISA$  nebo součinitel vnitřní propustnosti  $k_1$ . Experimentální měření byla prováděna ve stáří 1 měsíc, 1 rok a 2 roky.

Potvrdilo se, že klíčovým parametrem, který významným způsobem ovlivňuje výsledky měření propustnosti i absorpce, je aktuální vlhkost. Je zbytečné provádět měření bez současného měření aktuální vlhkosti, protože výsledky jsou zkreslené a není možné je mezi sebou porovnat.

Již po prvních experimentálních měřeních ve stáří 1 měsíc bylo zjištěno, že naměřená data přístrojem GWT nejeví známky žádné závislosti a naměřené hodnoty nelze porovnat ani s výsledky naměřenými přístrojem TPT ani metodou ISAT. Toto zjištění potvrdilo i závěr ze zahraniční literatury, kdy je uváděno, že GWT není přesným měřidlem a není tedy hojně využíván k hodnocení trvanlivosti betonu. Typ měřidla, které bylo používáno v rámci těchto srovnávacích testů, se již nevyrábí a výrobce vyrábí pokročilejší modely. Je tedy možné, že právě tento jeden kus zařízení nevykazuje dostatečnou přesnost, ale nové modely budou již spolehlivější a teoreticky by bylo možné srovnání vytvořit.

Naopak při měření metodou ISAT byly zjištěny pozitivní závěry a právoplatně je tato metoda využívána již téměř 85 let. Naměřená data umožnila vytvoření přepočtových vztahů na srovnávací 3% vlhkost a také porovnání s přístrojem TPT.

I když je měření hodnoty *ISA* po 60 min a 120 min přesnější než měření kratší, lze konstatovat, že měření po 30 min je dostačující pro odhad stávající absorpce betonu a poskytuje spolehlivé výsledky.

Z tohoto důvodu byla vypracována i podrobná metodika měření, která shrnula dříve známé závěry z dvou dostupných dokumentů [15][16], z nichž ani jeden neobsahuje komplexní zpracování naměřených dat, včetně vyhodnocení. Nová metodika stanovuje jednotný postup při provádění zkoušky, měření a vyhodnocení naměřených dat. Výsledné hodnoty absorpce se zařadí do jedné ze tříd absorpce (nízká, střední, vysoká) a vzhledem ke stávajícím podmínkám prostředí lze usuzovat na trvanlivost betonu. Tímto hodnocením nelze přesně zjistit kolik let životnosti betonové konstrukci zbývá, neboť nejsou zohledněny minulé ani budoucí podmínky užívání, ale jedná se o odhad aktuální trvanlivosti betonu, na základě kterého lze vytvořit prognózu životnosti betonové konstrukce.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Jedná se o výčet literatury, na kterou autorka narazila, nebo z ní bylo v disertační práci čerpáno. Rozsah čerpání z literatury je patrný z textu, kde je odkaz uveden. Pokud odkaz chybí, jedná se pouze o chybu ve formátování.

- [1] REINHARDT, H.W. *Penetration and Permeability of Concrete: Barriers to organic and contaminating liquids: state-of-the-art report prepared by members of the RILEM Technical Committee 146-TCF*. 1st ed. London: E & FN Spon. 1997, x, 331 p. ISBN 0 419 22560 9.
- [2] STATE OF THE ART REPORT OF RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC 189-NEC, "Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover"; edited by R. Torrent and L. Fernandez Luco. *Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover*. Bagneux: RILEM, 2007, xix, 223 s. ISBN 978-2-35158-054-7.
- [3] Blackie Academic & Professional, 1996, x, 286 s. ISBN 0-7514-0241-9.
- [4] KROPP, J. & HILSDORF, H.K. *Performance Criteria for Concrete Durability*. Rilem Report 12. 1995. 331 s. ISBN 0 419 19880 6.
- [5] DOBRÝ, O., PALEK, L. *Koroze betonu ve stavební praxi*. SNTL Praha 1988.
- [6] EMMONS, P.H., DROCHYTKA, R., JEŘÁBEK, Z. *Sanace a údržba betonu v ilustracích*. CERM Brno, 1999. ISBN 80-7204-106-1.
- [7] ZARRAGA, C. E. *How does Permeability of Concrete affect its Durability?* 2008. Dostupné z [www.grad.illinois.edu](http://www.grad.illinois.edu)
- [8] AĚTCIN, P.-C. *Vysokohodnotný beton*. Český překlad Vlastimil Bílek, 1. české vyd. Praha: ČKAIT - Praha 2005, 320 s. ISBN 80-86769-39-9.
- [9] ADÁMEK, J. *K problému hodnocení trvanlivosti betonu ve vztahu k životnosti ŽB konstrukce*. FC 2005. (powerpoint).
- [10] CLAISSE, P. *Transport Properties of Concrete*. Coventry University, Coventry CV1 5FB UK.
- [11] HELA, R. *Technologie betonu. Modul M01, BJ 04 Technologie betonu 1*. VUT v Brně. 2005.
- [12] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. VUT v Brně. 2000. ISBN 80-214-1647-5.
- [13] Přístroj pro měření permeability TORRENT – návod k použití.
- [14] Přístroj pro měření vodní propustnosti GWT – návod k použití, technický list.
- [15] Operating Instructions. Initial Surface Absorption Test. ELE International 2003.
- [16] BS 1881-208:1996 *Testing concrete. Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete*.
- [17] Technický list Autoclam Permeability System, dostupné z <http://www.wookyungse.co.kr/autoclam%20IV%20pdf.pdf>.

- [18] Technický list Poroscope Plus Concrete Air, dostupné z <http://www.worldoftest.com/poroscope.htm>
- [19] Dostupné z <http://pcte.com.au/concrete-non-destructive-testing-products/concrete-quality-and-strength-testing/Parrot-Permeability.aspx>.
- [20] Technický list GWT, dostupné z <http://www.germann.org>.
- [21] ADÁMEK, J., JURÁNKOVÁ, V., STEHLÍK, M. *Jiný pohled na trvanlivost betonu*. 12th International Scientific Conference. Brno. 2009.
- [22] BEUSHAUSEN, H., ALEXANDER, M.G. *The South African durability index tests in an international comparison*. Journal of the South African. 2008.
- [23] *Beton – vztah mezi strukturou a vlastnostmi*. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra materiálového inženýrství a chemie. Pdf. Dostupné z <http://www.fsv.cvut.cz>
- [24] LACH, V., DAŇKOVÁ, M. *Mikrostruktura stavebních látek*. Nakladatelství VUT Brno. ISBN 80-214-0309-8.
- [25] ADÁMEK, J. *Hodnocení metod povrchových charakteristik betonu v laboratořích i in situ prováděných v United Kingdom*. Dílčí zpráva ke grantu č. 108/93/2037 (GAČR) „Analýza využitelnosti a prognóza životnosti stavebních konstrukcí“. VUT FAST Brno. 1995.
- [26] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concrete Structure, properties and material*. Second edition. ISBN 0-13-175621-4.
- [27] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concrete Structure, properties and material*. First edition. 1986. New Jersey. ISBN 0-13-167115-4 01.
- [28] O'HANLON, J.F. *A User's Guide to Vacuum Technology*. Third Edition. ISBN 0-471-27052-0.
- [29] *Permeability Testing of site concrete – a review methods and experience*. Concrete society technical report no. 31. 1987.
- [30] LEONG, K. *Discontinuity in pore structure and its effect on mass transfer through hardened cement paste*. Toronto. 1998. ISBN 0-612-34120-8.
- [31] ROBERTS, L.R., SKALNY, J.P. *Pore Structure and Permeability of Cementitious Materials*. Materials Research Society symposium proceedings. Volume 137. USA. 1989. ISBN 1-55899-010-0. ISSN 0272-9172.
- [32] GLANVILLE, J., NEVILLE, A. *Prediction of Concrete Durability*. Proceedings of STSTS 21st Anniversary Conference. London, UK. 1997. ISBN 0-419-21170-5.
- [33] TORRENT, R. *A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*. Materials and Structures, v.25, n.150, 1992. pp. 358-365.
- [34] TORRENT, R. *The Gas-Permeability of High-Performance Concretes: Site and Laboratory Tests*. ACI Special Publication 186 "High Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures", 1999. pp. 291-308.



- [35] TORRENT, R., FRENZER, G. A Method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete". International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 1995.
- [36] ROSTAM, S. a kol. Durability and Service life of Concrete Structures. 1992. Second edition. UK. ISBN 0-7277-1620-4.
- [37] Guide to Durable Concrete. ACI Committee 201.2R-01. 2001. ISBN 0-087031-053-4.
- [38] DROCHYTKA, R. *Sanace silikátových konstrukcí*. Pdf.
- [39] WITZANY, Jiří et al. *Průzkum a hodnocení stavebně technického stavu panelových domů: program MPO ČR na podporu výzkumu a vývoje "Regenerace panelových domů"*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2000, 135 s. ISBN 8086364208.
- [40] JACKON, N. RAVINDRA, K.D. Civil Engineering Materials. 1997. ISBN 978-0333636831.
- [41] KUCHARCZYKOVÁ B., MISÁK P., VYMAZAL T. *Determination and Evaluation of the Air Permeability Coefficient using Torrent Permeability Tester*. RUSSIAN JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE TESTING. 2010. 46(3). p. 226 - 233. ISSN\~1061-8309.
- [42] MISÁK P., KUCHARCZYKOVÁ B., VYMAZAL T. *Determination of the quality of the surface layer of concrete using the TPT method and specification of the impact of humidity on the value of the air permeability coefficient*. Ceramics-Silikáty. 2010. 3(54). p. 290 - 294. ISSN\~0862-5468.
- [43] MISÁK P., KUCHARCZYKOVÁ B., VYMAZAL T. *Standardní operační postup pro přepočet hodnoty součinitel vzduchové propustnosti vzhledem k aktuální vlhkost [Standard operating procedure for the conversion of the air permeability coefficient according to current moisture] i*. 2009.
- [44] SEMERÁK P. *Kapacitní vlhkoměr PSMXi – hygrometer operating instructions*, Praha, 2008.
- [45] ŚLIWIŃSKI J., TRACZ T. *Metody badania przepuszczalności betonu dla cieczy i gazu*.
- [46] ČSN EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [47] SN 505 262/1: *Construction en béton – Spécifications complémentaires*.
- [48] DIN 1045: Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung.
- [49] SABIR B.B., WILD S., O'FARRELL M. *A water sorptivity test for mortar and concrete. Materials and Structure*. Vol. 31. 1998. pp 568-574.
- [50] HALL C. *Water sorptivity of mortars and concretes: a review*. Magazine of Concrete Research. No. 147. 1989. pp 51-61.
- [51] DE SCHUTTER, Geert et al. *Samozhutnitelný beton*. 1. české vyd. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008, 344 s. ISBN 978-80-87158-12-8.

- [52] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [53] DIN 1048, part 5 (1991) Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Deutsches Institut für Normung.
- [54] GBJ 82-85 (1985) Test methods of aging performance and durability for ordinary concrete. Chinese Standard.
- [55] NEN EN 12390-8 (2001) *Prüfung von Festbeton – Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck*.
- [56] CONTROLS s.r.l. [online]. [cit. 20.května 2015]. Dostupné z <http://www.controls-group.com>
- [57] DAVIS, A.G. a kol. ACI 228.2R-98 *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Reported by ACI Committee 228. American Concrete Institute. 1998 (Reapproved 2004). 62s.
- [58] LABTECH s.r.o. [online]. [cit. 2.května 2014]. Dostupné z <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/propustomer-vody-metoda-dr-carstense.html>
- [59] Usmal Akmal. *Evaluation Of Covercrete Quality Of Rc Structures Using Surface Water Absorption Test*. Yokohama National University, Yokohama, Japan, 2012.
- [60] Materials Advanced Services Ltd. [online]. [cit. 20.května 2015]. Dostupné z <http://www.permeatorr.com.ar/eng/product.php>
- [61] Claisse, P.A., Elsayad, H.I. and Shaaban, I.G. (1997) *Absorption and sorptivity of cover concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, volume 9 (3): 105-110.
- [62] ZIA, P., Nutez, R.A., LUIZ, A.M. *Implementation Of Self-Consolidating Concrete For Prestressed Concrete Girders*. Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering. North Carolina State University. Raleigh, N.C. 27695-7908. 2005. Pdf.
- [63] JACOBS, F., HUNKELER, F. *Air permeability as a characteristic parameter for the quality of cover concrete*. In International Conference in honour of Prof. A. Long and Prof. J. Bungey, Concrete Platform 2007.pdf
- [64] CASTRO, J., SPRAGG, R., COMPARE, P., WEISS, W.J. Portland Cement Concrete Pavement Permeability Performance. Joint Transportation Research Program. FHWA/IN/JTRP-2010/29. 2010. 258 s.
- [65] Dostupné z <http://www.proceq.com/>
- [66] Claisse, P.A., Elsayad, H.I. and Shaaban, I.G. (1999) *Test methods for measuring fluid transport in cover concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, volume 11 (2): 138–143.
- [67] ERBEN, M. *Vakuová technika, Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií, učební text*. Katedra obecné a anorganické chemie, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice. 2008

- [68] James Instruments Inc. [online]. [cit. 20.května 2015]. Dostupné z <http://www.ndtjames.com>
- [69] MALHOTRA, V.M., CARINO N.J. *Handbook On Nondestructive Testing Of Concrete. Second Edition*. CRC Press LLC. ISBN 0-8031-2099-0. 2004.
- [70] Gomes A.M., Costa J.O., Albertini H., Aguiar J.E. *Permeability of Concrete: A Study Intended for the "in situ" Valuation Using Portable Instruments and Traditional Techniques*. Dostupné z <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v017/v017.htm>
- [71] Krishnan A. Selection Criteria for Waterproofing Chemicals.[online] 2012 [cit. 12-3-2015]. Dostupné z: <http://www.ficci.com/events/20862/ISP/Ajay%20Krishnan.pdf>
- [72] Dhanya B. S. *Transport mechanisms in concrete and durability test methods*. National Workshop on Achieving Durable Concrete Construction Through Performance Testing. [online]. [cit. 1.června 2015]. Dostupné z <http://www.theconcreteportal.com/dhanya.pdf>
- [73] Mehta P.K., Monteiro P.J.M. *Permeability of Concrete*. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. [online]. Dostupné z <http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/241/permeability.pdf>
- [74] Sklocement Beneš s. r. o., VLAKNADOBETONU.CZ [cit. 15.září 2015]. Dostupné z <http://www.vlaknadobetonu.cz>
- [75] BECHYNĚ, Stanislav. *Technologie betonu*, sv. 5. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                        |                                                                                                                    |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VZ                     | vlastní zpracování                                                                                                 |
| ČB                     | čerstvý beton                                                                                                      |
| ZB                     | zatvrdlý beton                                                                                                     |
| $w$                    | povrchová hmotnostní vlhkost [%]                                                                                   |
| $k_T$ ( $k_{T,w}$ )    | součinitel vzduchové propustnosti [ $\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ] při aktuální povrchové vlhkosti $w$             |
| $k_{T;3}$              | součinitel vzduchové propustnosti [ $\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ] při povrchové vlhkosti $w = 3 \%$               |
| $ISA_{10 \text{ min}}$ | počáteční povrchová absorpce ISA po 10 min při aktuální povrchové vlhkosti $w$ [ $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ] |
| $ISA_{30 \text{ min}}$ | počáteční povrchová absorpce ISA po 30 min při aktuální povrchové vlhkosti $w$ [ $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ] |
| $k_1$                  | součinitel vnitřní propustnosti [ $\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ]                                                   |

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Příloha č. 1 – Výsledky experimentálního měření spolupráce s OHL ŽS, a.s.....                                                 | 154 |
| Příloha č. 2 – Výsledky experimentálního měření GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech..... | 157 |

## Příloha č. 3 – Výsledky experimentálního měření FAST-J-10-96 Porovnání výsledků

zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny .....159

## Příloha č. 4 – Výsledky experimentálního měření FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu

NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti .....165

## Příloha č. 5 – Výsledky experimentálního měření FAST-S-11-22 Ověření a určení možností

stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu .....171

**12 SEZNAM OBRÁZKŮ**

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Vznik vzduchových dutin v důsledku nesprávného ukládání betonu [6], [38] .....             | 14 |
| Obr. 2 Závislost vodního součinitele na stupni hydratace [4] .....                                | 16 |
| Obr. 3 Schématické znázornění pórů v cementovém gelu betonu [12]: .....                           | 16 |
| Obr. 4 Model vody při hydrataci cementu podle R. F. Feldmana a P. J. Seredy [23], 36.....         | 17 |
| Obr. 5 Model C-S-H gelu podle Feldmana a Seredy [23].....                                         | 17 |
| Obr. 6 Schéma tranzitní zóny v betonu [52].....                                                   | 19 |
| Obr. 7 Schéma nadbytečné vody uzavřené pod hrubými zrny kameniva [52] .....                       | 20 |
| Obr. 8 Krycí (povrchová) vrstva betonu [VZ dle 6] .....                                           | 21 |
| Obr. 9 Princip difúze (VZ [1]) .....                                                              | 22 |
| Obr. 10 Grafické znázornění difúze (VZ [4]) .....                                                 | 22 |
| Obr. 11 Princip propustnosti (VZ [1]) .....                                                       | 24 |
| Obr. 12 Grafické znázornění propustnosti [1] .....                                                | 24 |
| Obr. 13 Vliv stárí betonu na jeho propustnost [75] .....                                          | 24 |
| Obr. 14 Schéma závislostí transportních jevů na vlastnostech betonu .....                         | 28 |
| Obr. 15 Vliv cementu a poměru v/c na kapilární nasákavost malt [75].....                          | 30 |
| Obr. 16 Schéma metody Autoclam Permeability Systém (a) upevnění (b) způsob ovládání<br>[57] ..... | 40 |
| Obr. 17 Autoclam permeability systém a dva typy přírub pro měření [16] .....                      | 41 |
| Obr. 18 Schéma zařízení CLAM [57].....                                                            | 42 |
| Obr. 19 Schéma metody FTP [2] .....                                                               | 42 |
| Obr. 20 Schéma Figg Test pro vodu [59].....                                                       | 43 |
| Obr. 21 Schéma zařízení CAT [25].....                                                             | 44 |
| Obr. 22 Typické křivky smáčení vodou o teplotě 35°C po provedení metody CAT [61].....             | 45 |
| Obr. 23 Foto Poroscope-Plus [67] .....                                                            | 45 |
| Obr. 24 Foto Poroscope-Plus [67] .....                                                            | 45 |
| Obr. 25 Vertikálně umístěný přístroj POROSItester [59].....                                       | 46 |
| Obr. 26 Kompletní měřicí sada TQC Karsten Tube [59] .....                                         | 47 |
| Obr. 27 Foto metody dr. Carstense [58] .....                                                      | 47 |
| Obr. 28 Sada TQC Karsten Tube pro horizontální měření [59] .....                                  | 47 |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 29 Sada TQC Karsten Tube pro vertikální měření [59] .....                                                                                   | 47 |
| Obr. 30 Schéma Steinertovy metody [57] .....                                                                                                     | 48 |
| Obr. 31 Schéma metody SWAT [59].....                                                                                                             | 49 |
| Obr. 32 Foto metody SWAT [59] .....                                                                                                              | 49 |
| Obr. 33 Schéma metody SWAT: (a) detail upevnění; (b) rozložení při testu [59] .....                                                              | 49 |
| Obr. 34 Schéma metody AUTOCLAM pro stanovení vzduchové propustnosti [59].....                                                                    | 51 |
| Obr. 35 Schéma metody Cembureau [22] .....                                                                                                       | 51 |
| Obr. 36 Metoda Cembureau – vlevo měřící zařízení [56], vpravo nahoře měřící nádoba [56],<br>vpravo dole schéma kyslíkové metody [6].....         | 52 |
| Obr. 37 Schéma Figgova Testu pro vzduch [59].....                                                                                                | 52 |
| Obr. 38 Vliv podmínek ošetřování na koeficient vzduchové propustnosti betonu Figgovým<br>Testem ve stáří 28 dnů [25] .....                       | 53 |
| Obr. 39 Foto Poroscope-Plus [67] .....                                                                                                           | 53 |
| Obr. 40 Foto Poroscope-Plus [67] .....                                                                                                           | 53 |
| Obr. 41 Schéma metody GGT [2] .....                                                                                                              | 54 |
| Obr. 42 Foto metody GGT [2].....                                                                                                                 | 54 |
| Obr. 43 Schéma metody GGT dle [64] .....                                                                                                         | 54 |
| Obr. 44 Schéma Hong-Parrott [2] .....                                                                                                            | 55 |
| Obr. 45 Grafické znázornění výsledků s metodou Hong-Parrott a Cambureau [2].....                                                                 | 56 |
| Obr. 46 The Parrott Permeability Test Kit [19] .....                                                                                             | 56 |
| Obr. 47 Schéma OPI Testu [22] a pohled na zařízení [67].....                                                                                     | 57 |
| Obr. 48 Schéma Paulmann [2] .....                                                                                                                | 58 |
| Obr. 49 Schéma metody SAF test [57] – vzduchová propustnost.....                                                                                 | 58 |
| Obr. 50 Schéma Schönlina testu dle [2].....                                                                                                      | 59 |
| Obr. 51 Metoda Permea-TORR [60] .....                                                                                                            | 60 |
| Obr. 52 Dvoukomorová měřící buňka přístroje Permea-TORR, a) spodní pohled, b) horní<br>pohled [60].....                                          | 60 |
| Obr. 53 Schéma metody Permea-TORR [60] .....                                                                                                     | 61 |
| Obr. 54 Schéma metody TUD [2] .....                                                                                                              | 64 |
| Obr. 55 Vliv poměru v/c a době ošetřování na času TUD měření s hodnocení kvality<br>povrchové vrstvy betonu [2] .....                            | 64 |
| Obr. 56 Vztah mezi časem při měření metodou TUD (TUD time) a propustností stanovenou<br>metodou Cembureau (O <sub>2</sub> permeability) [2]..... | 65 |
| Obr. 57 Schéma metody Zia-Guth [2] .....                                                                                                         | 65 |
| Obr. 58 Typické rozložení zařízení Zia-Guth při zkoušení betonových desek [62] .....                                                             | 65 |
| Obr. 59 Schéma etap disertační práce .....                                                                                                       | 71 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 60 Pohled na přístroj TPT. Nahoře přenosný červený kurf, pod ním vývěva, uprostřed snímací vakuová buňka umístěná na betonové dlaždici, vlevo dole regulátor tlaku, vpravo bílá ovládací jednotka s digitálním displejem (archiv Kadlecová).....          | 73 |
| Obr. 61 Schéma přístroje TPT (VZ) .....                                                                                                                                                                                                                        | 73 |
| Obr. 62 Klasifikace kvality povrchové vrstvy betonu dle dr. Torrenta (VZ dle [2]).....                                                                                                                                                                         | 74 |
| Obr. 63 Wennerova sonda [65].....                                                                                                                                                                                                                              | 75 |
| Obr. 64 Nomogram pro určení kvalitativní kategorie betonu ve vztahu k aktuální vlhkosti [13] .....                                                                                                                                                             | 75 |
| Obr. 65 Schéma metody GWT - 4000 [20].....                                                                                                                                                                                                                     | 76 |
| Obr. 66 Přístroj GWT – modré svorky pro upevnění přístroje k povrchu, mikrometrický šroub, tlakoměr, napoštěcí (s nálevkou) a vypouštěcí ventil (archiv Kadlecová) .....                                                                                       | 78 |
| Obr. 67 Pohled na přístroj GWT (archiv Kadlecová) .....                                                                                                                                                                                                        | 78 |
| Obr. 68 Přístroj GWT na krychli [71].....                                                                                                                                                                                                                      | 78 |
| Obr. 69 Sací podložka s vakuovou pumpou pro GWT [20] .....                                                                                                                                                                                                     | 78 |
| Obr. 70 Přístroj ISAT (na černém podkladu jsou ukotveny průhledná nálevka a kapilára se stupnicí, akrylátová komora je připevněná na betonovém povrchu zelenými svorkami a vše je propojeno oranžovými přívodními a odvodními hadičkami (archiv Kadlecová).... | 79 |
| Obr. 71 Schéma zařízení ISAT .....                                                                                                                                                                                                                             | 80 |
| Obr. 72 Grafické znázornění hodnocení výsledků metodou ISAT [VZ] .....                                                                                                                                                                                         | 81 |
| Obr. 73 Typické křivky smáčení vodou o teplotě 35 °C po provedení metody ISAT [61] .....                                                                                                                                                                       | 82 |
| Obr. 74 Závislost $v/c$ na a) vnitřní propustnosti, b) hodnotě $I_{SA}$ v čase 10 min [40].....                                                                                                                                                                | 83 |
| Obr. 75 Vliv vodního součinitele na propustnost betonu při objemové hmotnosti 3 000 kg.m <sup>-3</sup> , stáří 9 měsíců a tlaku vody 3 atm. [75].....                                                                                                          | 83 |
| Obr. 76 Vliv typu betonu na povrchové absorpci betonu [25].....                                                                                                                                                                                                | 83 |
| Obr. 77 Vliv času na počáteční povrchové absorpci [25] .....                                                                                                                                                                                                   | 84 |
| Obr. 78 Vliv pevnosti v tlaku na hodnotě $I_{SA}$ [25].....                                                                                                                                                                                                    | 84 |
| Obr. 79 Vliv počátečního vlhkého uložení na pevnosti v tlaku a počáteční povrchové absorpci [25] .....                                                                                                                                                         | 84 |
| Obr. 80 Vliv sednutí kužele na povrchové absorpci betonu při $w = 0,55$ [25] .....                                                                                                                                                                             | 85 |
| Obr. 81 Vliv sednutí kužele na počáteční povrchové absorpci [25] .....                                                                                                                                                                                         | 85 |
| Obr. 82 Vliv doby vysušování na povrchové absorpci [25].....                                                                                                                                                                                                   | 86 |
| Obr. 83 Vliv doby vysušování na ztrátu vlhkosti [25].....                                                                                                                                                                                                      | 86 |
| Obr. 84 Kapacitní vlhkoměr Kakaso (PSMXi) .....                                                                                                                                                                                                                | 87 |
| Obr. 85 Kalibrační křivka pro beton [44] .....                                                                                                                                                                                                                 | 87 |
| Obr. 86 Vlákna Stavon délky 12 mm .....                                                                                                                                                                                                                        | 92 |
| Obr. 87 Vlákna Econo-Net délky 38 mm.....                                                                                                                                                                                                                      | 92 |
| Obr. 88 Vlákna Anti-crak délky 12 mm [74].....                                                                                                                                                                                                                 | 92 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 89 Betonáž mostovky, při níž byly odebrány vzorky pro nedestruktivní zkoušky<br>(fotoarchiv P. Cikrle) .....                    | 95  |
| Obr. 90 Aplikace odbedňovacího přípravku .....                                                                                       | 96  |
| Obr. 91 Částečně naplněná dřevěná forma na vibračním stole .....                                                                     | 96  |
| Obr. 92 Plnění dřevěné formy na vibračním stole ve dvou vrstvách .....                                                               | 96  |
| Obr. 93 Vibrace naplněné formy .....                                                                                                 | 96  |
| Obr. 94 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu<br>2 % - trámec 5 .....                            | 99  |
| Obr. 95 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu<br>2 % - trámec 6 .....                            | 100 |
| Obr. 96 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu<br>10 % - trámec 5 .....                           | 100 |
| Obr. 97 Grafické znázornění naměřených dat – provzdušněný beton s obsahem vzduchu<br>10 % - trámec 6 (měřeno na bedněné hraně) ..... | 101 |
| Obr. 98 Rozčlenění zkoušek na betonové dlaždice .....                                                                                | 102 |
| Obr. 99 Grafické znázornění postupu měření GAČR č. 103/09/0065 [VZ] .....                                                            | 102 |
| Obr. 100 Závislost koeficientu vzduchové propustnosti $k_{T,3}$ na stáří betonu .....                                                | 103 |
| Obr. 101 Závislost úbytku tlakové vody na čase při zkoušce GWT .....                                                                 | 103 |
| Obr. 102 Závislost koeficientu vnitřní permeability $k_1$ na stáří vzorku .....                                                      | 104 |
| Obr. 103 Závislost hodnoty $ISA$ v čase .....                                                                                        | 104 |
| Obr. 104 Závislost hodnoty počáteční povrchové absorpce $ISA$ na stáří betonu .....                                                  | 105 |
| Obr. 105 Grafické znázornění postupu měření FAST-J-10-96 [VZ] .....                                                                  | 106 |
| Obr. 106 Přehled naměřených výsledků koeficientu vnitřní propustnosti $k_1$ na dílčích vzorcích<br>.....                             | 107 |
| Obr. 107 Závislost součinitele vnitřní permeability $k_1$ na povrchové vlhkosti $w$ .....                                            | 107 |
| Obr. 108 Závislost vnitřní permeability $k_1$ na součiniteli vzduchové propustnosti $k_T$ .....                                      | 108 |
| Obr. 109 Povrchové počáteční absorpce $ISA_{10\ min}$ , $ISA_{30\ min}$ a $ISA_{60\ min}$ u dílčích vzorků .....                     | 108 |
| Obr. 110 Závislost typu vláken a vodního součinitele na součiniteli vzduchové propustnosti<br>$k_{T3}$ .....                         | 109 |
| Obr. 111 Grafické znázornění postupu měření FAST-J-11-12 [VZ] .....                                                                  | 110 |
| Obr. 112 Grafické znázornění postupu měření FAST-S-11-22 [VZ] .....                                                                  | 116 |
| Obr. 113 Závislost hodnoty $ISA_{10\ min}$ na vlhkosti $w$ ; stáří 1 měsíc .....                                                     | 124 |
| Obr. 114 Závislost hodnoty $ISA_{10\ min}$ na vlhkosti $w$ ; stáří 1 rok .....                                                       | 125 |
| Obr. 115 Závislost hodnoty $ISA_{10\ min}$ na vlhkosti $w$ ; stáří 2 roky .....                                                      | 126 |
| Obr. 116 Závislost hodnoty $ISA_{10\ min}$ na vlhkosti $w$ ; bez ohledu na stáří .....                                               | 126 |
| Obr. 117 Závislost hodnoty $ISA_{30\ min}$ na vlhkosti $w$ ; stáří 1 měsíc .....                                                     | 128 |
| Obr. 118 Závislost hodnoty $ISA_{30\ min}$ na vlhkosti $w$ ; stáří 1 rok .....                                                       | 129 |
| Obr. 119 Závislost hodnoty $ISA_{30\ min}$ na vlhkosti $w$ ; stáří 2 roky .....                                                      | 130 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 120 Závislost hodnoty $ISA_{30\ min}$ na vlhkosti $w$ ; bez ohledu na stáří .....            | 130 |
| Obr. 121 Závislost součinitele vzduchové propustnosti $k_T$ na vlhkosti $w$ ; stáří 1 měsíc ..... | 132 |
| Obr. 122 Závislost hodnoty $ISA_{10\ min}$ na součiniteli $k_T$ ; stáří 1 měsíc .....             | 133 |
| Obr. 123 Závislost hodnoty $ISA_{30\ min}$ na součiniteli $k_T$ ; stáří 1 měsíc .....             | 134 |

### 13 SEZNAM TABULEK

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1 Klasifikace pórů v hydratované cementové pastě [23], [51] .....                                     | 18 |
| Tab. 2 Vodní propustnost cementové pasty [67] .....                                                        | 24 |
| Tab. 3 Vodní propustnost kamene [67] .....                                                                 | 24 |
| Tab. 4 Informativní klasifikace tlaků [67] .....                                                           | 25 |
| Tab. 5 Závislost tlaku vzduchu v kapilárách [75] .....                                                     | 29 |
| Tab. 6 Vliv stáří betonu na hodnotě součinitele propustnosti $k_P$ [12] .....                              | 31 |
| Tab. 7 Zkušební zařízení pro měření propustnosti vzduchu I .....                                           | 35 |
| Tab. 8 Zkušební zařízení pro měření propustnosti vzduchu II .....                                          | 36 |
| Tab. 9 Zkušební zařízení pro měření absorpce I. ....                                                       | 37 |
| Tab. 10 Zkušební zařízení pro měření absorpce II. a propustnosti vody .....                                | 38 |
| Tab. 11 Kvalita betonu v závislosti na indexu vzduchové propustnosti [2] .....                             | 41 |
| Tab. 12 Kvalita betonu v závislosti na sorptivitě [2] .....                                                | 42 |
| Tab. 13 Klasifikace povrchu metodou Poroscope (vodní absorpcí) [2] .....                                   | 46 |
| Tab. 14 Hodnocení kvality betonu – test OPI [67] .....                                                     | 57 |
| Tab. 15 Klasifikace výsledků dle Permea-TORRRu [60] .....                                                  | 63 |
| Tab. 16 Kategorie betonu podle Zia-Guth metody [2] .....                                                   | 66 |
| Tab. 17 Srovnání variačních koeficientů jednotlivých metod při měření Torrenta<br>a Edenspergera [2] ..... | 66 |
| Tab. 18 Srovnání variačních koeficientů jednotlivých metod při měření Goncalvese a Nevese<br>[2] .....     | 66 |
| Tab. 19 Třídy kvality krycích vrstev betonu [13] .....                                                     | 75 |
| Tab. 20 Klasifikace kvality betonu pro přístroj GWT dle RILEM TC PSC-230 Draft [13] .....                  | 77 |
| Tab. 21 Standartní klasifikace betonů pro přístroj GWT při tlaku 0,4 bar [13] .....                        | 78 |
| Tab. 22 Klasifikace povrchové vrstvy betonu metodou ISAT [2] .....                                         | 81 |
| Tab. 23 Obecný vztah mezi propustností a absorpcí - výsledky na suchém betonovém<br>povrchu (VZ [2]) ..... | 82 |
| Tab. 24 Přehled hlavních veličin pro experimentální sledování .....                                        | 88 |
| Tab. 25 Receptura čerstvé betonové směsi – referenční beton .....                                          | 90 |
| Tab. 26 Receptura čerstvé betonové směsi pro měření na dlaždicích .....                                    | 91 |
| Tab. 27 Receptura čerstvé betonové směsi pro měření na krychlích .....                                     | 92 |
| Tab. 28 Receptura čerstvé betonové směsi – vláknobeton .....                                               | 93 |
| Tab. 29 Receptura čerstvé betonové směsi – referenční beton .....                                          | 94 |



|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tab. 30 Klasifikace Základního testu* a určení intervalu měření počáteční povrchové absorpce metodou ISAT [16] ..... | 111 |
| Tab. 31 Hlavní rozdíly mezi BS 1881/208 a Operačním postupem ISAT .....                                              | 114 |
| Tab. 32 Klasifikace povrchové vrstvy betonu metodou ISAT [2] .....                                                   | 115 |
| Tab. 33 Obecný vztah mezi propustností a zkouškou absorpce na suchém betonu [2] .....                                | 115 |
| Tab. 34 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{10\ min} - w$ (stáří 1 měsíc).....                           | 123 |
| Tab. 35 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{10\ min} - w$ (stáří 1 rok) .....                            | 124 |
| Tab. 36 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{10\ min} - w$ (stáří 2 roky) .....                           | 125 |
| Tab. 37 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{10\ min} - w$ (bez ohledu na stáří)....                      | 127 |
| Tab. 38 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{30\ min} - w$ (stáří 1 měsíc).....                           | 128 |
| Tab. 39 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{30\ min} - w$ (stáří 1 rok) .....                            | 128 |
| Tab. 40 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{30\ min} - w$ (stáří 2 roky) .....                           | 129 |
| Tab. 41 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{30\ min} - w$ (bez ohledu na stáří)....                      | 131 |
| Tab. 42 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $k_T - w$ (stáří 1 měsíc).....                                     | 131 |
| Tab. 43 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{10\ min} - k_T$ (stáří 1 měsíc) .....                        | 133 |
| Tab. 44 Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{30\ min} - k_T$ (stáří 1 měsíc) .....                        | 134 |
| Tab. 45 Přepočtové vztahy $ISA - w$ .....                                                                            | 135 |
| Tab. 46 Přepočtové vztahy $ISA - k_T$ .....                                                                          | 135 |
| Tab. 47: Hodnota koeficientu $\mu$ v závislosti na teplotě vody [2].....                                             | 189 |

**14 PUBLIKAČNÍ ČINNOST****ČASOPISY, KNIHY****2013:**

- (1) HRONOVÁ, P.; KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J. Porovnání vlivu vodního součinitele a různých typů vláken na vznik trhlin v raném věku betonu, článek v *TZB-info*, ISSN 1801-4399, Topinfo s.r.o., Praha, 2013.

**2012:**

- (2) KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; HRONOVÁ, P. Využití metody Torrent Permeability Tester pro kontrolu kvality povrchové vrstvy betonových konstrukcí, článek v *TZB-info*, ISSN 1801-4399, Topinfo s.r.o., Praha, 17.12.2012.
- (3) REITERMAN, P.; KADLECOVÁ, Z.; KOLÁŘ, K.; KEPPERT, M.; ADÁMEK, J.; et al. Zohlednění trvanlivosti při hodnocení kvality povrchové vrstvy betonu. In: *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2012, roč. 2012, č. 3, s. 62-66. ISSN 1213-3116.
- (4) ADÁMEK, J.; JURÁNKOVÁ, V.; KADLECOVÁ, Z.; STEHLÍK, M. Three NDT Methods for the Assessment of Concrete Permeability as a Measure of Durability. In *Nondestructive testing of materials and structures*. Rilem Bookseries. *Istanbul, Turecko, Springer in RILEM Bookseries*. 2012. P. 732 - 738. ISBN 978-94-007-0722-1.

**2011:**

- (5) KADLECOVÁ, Z.; HRONOVÁ, P.; ADÁMEK, J. Zkoušky propustnosti povrchové vrstvy betonu jako podklad pro odhad aktuální trvanlivosti betonu. *BETON-technologie, konstrukce, sanace*. Praha, *Beton TKS*. 2011(3). P. 82 - 82. ISSN 1213-3116.

**KONFERENČNÍ PŘÍSPĚVKY****2012:**

- (6) REITERMAN, P.; KEPPERT, M.; HOLČAPEK, O.; KADLECOVÁ, Z.; KOLÁŘ, K.; Permeability of Concrete Surface Layer. In: *Proceedings of the 50th Annual Conference on Experimental Stress Analysis*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2012, p. 361-368. ISBN 978-80-01-05060-6.
- (7) REITERMAN, P.; KOLÁŘ, K.; HOLČAPEK, O.; KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J. Observation of Fair-face Concrete Durability using Various Testing Methods. In: *Concrete in the Low Carbon Era*. Dundee: University of Dundee, 2012, p. 1-5. ISBN 978-0-9573263-0-9.

**2011:**

- (8) REITERMAN, P., KOLÁŘ, K., KADLECOVÁ, Z., ADÁMEK, J., KEPPERT, M. Sledování vlastností povrchových vrstev betonu pro odhad jeho trvanlivosti. In: *Sanace 2011*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2011, s. 37-42. ISSN 1211-3700.

- (9) KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; REITERMAN, P. Sledování vzduchové propustnosti pohledových betonů v čase. In *Sborník recenzovaných příspěvků 2011*. BRNO. 2011. P. 123 - 131. ISBN 978-80-214-4338-9.
- (10) HRONOVÁ, P.; KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; ROHRBACHER, I. Porovnání hodnot vzduchové propustnosti u betonů s různým vodním součinitelem a s použitím různých druhů vláken. In *Sborník recenzovaných příspěvků 2011*. Brno, VUT BRNO. 2011. P. 97 - 100. ISBN 978-80-214-4338-9.
- (11) ROHRBACHER, I.; KADLECOVÁ, Z.; HRONOVÁ, P. Vliv vodního součinitele a disperzních vláken na krychelnou pevnost betonových vzorků. In *Sborník recenzovaných příspěvků 2011*. Brno, VUT V BRNĚ. 2011. P. 341 - 344. ISBN 978-80-214-4338-9.
- (12) REITERMAN, P.; KADLECOVÁ, Z.; HOLČAPEK, O.; KOLÁŘ, K.; HUŇKA, P.; et al. Durability of fair-face concrete surface layer. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on High performance Concrete*. Auckland: New Zealand Concrete Society, 2011, p. 1-5. ISBN 978-0-473-19287-7.
- (13) KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; REITERMAN, P. Hodnocení pohledových betonů NDT metodami z hlediska trvanlivosti. In: *Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky*. Brno: VUSTAH - Výzkumný ústav stavebních hmot, 2011, s. 150-153. ISBN 978-80-87397-06-0.
- (14) KADLECOVÁ, Z.; HRONOVÁ, P.; ADÁMEK, J. Zkoušky propustnosti povrchové vrstvy betonu jako podklad pro odhad aktuální trvanlivosti betonu. In *Sborník anotací Juniorstav 2011*. Brno. 2011. P. 188 - 193. ISBN 978-80-214-4232-0.

**2010:**

- (15) KADLECOVÁ, Z.; ODEHNALOVÁ, P.; ADÁMEK, J. Permeability tests of the surface layer of concrete as a basis for the estimation of current durability of concrete. In *8th International Conference NDT 2010 - Non-Destructive Testing in Engineering Practice (ID 18982)*. BRNO. 2010. P. 43 - 49. ISBN 978-80-7204-723-9.
- (16) KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; REITERMAN, P. Hodnocení betonových kvádrů z hlediska trvanlivosti. In: *Zkoušení a jakost ve stavebnictví*. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2010, s. 75-82. ISBN 978-80-214-4144-6.
- (17) REITERMAN, P.; KOLÁŘ, K.; KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; HOLČAPEK, O. Experimentální vyšetřování povrchových vrstev. In: *7. konference speciální betony - sborník konference*. Praha: Sekurkon, 2010, s. 31-38. ISBN 978-80-86604-50-3.
- (18) REITERMAN, P.; KOLÁŘ, K.; ADÁMEK, J.; KADLECOVÁ, Z.; HOLČAPEK, O. Sorptive properties of concrete surface layer. In: *Concrete Structures for Challenging Times*. Praha: ČBS - Česká betonářská společnost ČSSI, 2010, p. 424-428. ISBN 978-80-87158-26-5.
- (19) KADLECOVÁ, Z.; ODEHNALOVÁ, P.; ADÁMEK, J. Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy pro vzduch a vodu. *Betonářské dny 2010*. ISBN 978-80-8076-089-2, Bratislava, 2010.

- (20) ODEHNALOVÁ, P.; KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J. Hodnocení povrchové vrstvy betonu zkouškami propustnosti. *Betonářské dni 2010*. ISBN 978-80-8076-089-2, BRATISLAVA, 2010.
- (21) KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ANTON, O. Evaluation of the Influence of a Scanning Method on the Resulting Quality of the GPR Images. *XIII. International Conference on Ground Penetrating Radar*. Lecce. Italy. 2010. ISBN 978-1-4244-4605-6.
- (22) KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J. Porovnání vodní a vzduchové propustnosti povrchových vrstev betonu. *XIV. Mezinárodní konference Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky*. VUSTAH. 2010. p. 364 - 367. ISBN 978-80-87397-02-2.
- (23) ADÁMEK, J.; KADLECOVÁ, Z.; JURÁNKOVÁ, A. Detection of Imperfection in Concrete Structure from Durability Viewpoint. *In 8th International Conference NDT 2010 Non-destructive testing*. Brno. 2010. p. 15 - 22. ISBN 978-80-7204-723-9.
- (24) KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ANTON, O. Využití nedestruktivní diagnostické GPR metody pro lokalizaci výztuže v železobetonových konstrukcích a zhodnocení vlivu způsobu skenování na poloze výztuže. *XX. mezinárodní symposium Sanace betonových konstrukcí 2010*. Brno. 2010. ISBN 1211-3700.
- (25) KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ŠTAINBRUCH, J.; ANTON, O. Porovnání kvality GPR snímků v závislosti na způsobu skenování. *In Sborník anotací Juniorstav 2010*. CERM. Brno. 2010. p. 208 - 208. ISBN 978-80-214-4042-5.
- (26) KADLECOVÁ, Z.; KORDINA, T.; ŠTAINBRUCH, J.; ANTON, O. Detekce ocelové výztuže pomocí 3D GPR. *In Sborník anotací Juniorstav 2010*. CERM. Brno. 2010. p. 205 - 205. ISBN 978-80-214-4042-5.

**2009:**

- (27) KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ŠTAINBRUCH, J. Location of Steel Reinforcement and Other Reinforcing Elements using 3D GPR. *Transactions on transport sciences*. 2009. 4(4 2009). p. 150 - 157. ISSN 1802-971X.
- (28) KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ŠTAINBRUCH, J. Location of Steel Reinforcement and Other Reinforcing Elements using 3D GPR. *7th Workshop NDT 2009 Non Destructive Testing in Engineering Practice*. Brno. 2009. p. 88 - 225. ISBN 978-80-7204-671-3.
- (29) KADLECOVÁ, Z.; KORDINA, T. Míra zčernání křemenného skla v závislosti na záření gama. *In Sborník anotací konference Juniorstav 2009.1*. VUT FAST Brno. 2009. p. 196 - 196. ISBN 978-80-214-3810-1.

**Příloha č. 1 – Výsledky experimentálního měření spolupráce s OHL ŽS, a.s.**

Tabulka A: Výsledky experimentálního měření s OHL ŽS, a.s. - měření na trámčích při různých stupních sušení a stáří v rozmezí 21 až 54 dní

| Vzorek  | Stáří | Způsob sušení | VLHKOST | ISAT                   |          |                        |          |
|---------|-------|---------------|---------|------------------------|----------|------------------------|----------|
|         |       |               | $w$     | $ISA_{10 \text{ min}}$ |          | $ISA_{30 \text{ min}}$ |          |
|         | [dny] |               | [%]     | [ml/m <sup>2</sup> /s] | absorpce | [ml/m <sup>2</sup> /s] | absorpce |
| 5 - 2%  | 21    | -             | 1,36    | 0,26                   | střední  | 0,14                   | nízká    |
| 5 - 2%  | 28    | 50 °C, 8 h    | 0,50    | 0,31                   | střední  | 0,20                   | střední  |
| 5 - 2%  | 36    | 110 °C, 72 h  | 0,12    | 0,42                   | střední  | 0,30                   | střední  |
| 5 - 2%  | 54    | 50 °C, 72 h   | 1,17    | 0,17                   | nízká    | 0,10                   | nízká    |
| 5 - 10% | 21    | -             | 1,10    | 0,29                   | střední  | 0,14                   | nízká    |
| 5 - 10% | 28    | 50 °C, 48 h   | 0,33    | 0,50                   | střední  | 0,27                   | střední  |
| 5 - 10% | 36    | 110 °C, 72 h  | 0,10    | 0,74                   | vysoká   | 0,36                   | vysoká   |
| 5 - 10% | 54    | 50 °C, 72 h   | 0,78    | 0,21                   | nízká    | 0,13                   | nízká    |
| 6 - 2%  | 21    | -             | 1,35    | 0,24                   | nízká    | 0,11                   | nízká    |
| 6 - 2%  | 28    | 50 °C, 48 h   | 0,52    | 0,43                   | střední  | 0,24                   | střední  |
| 6 - 2%  | 36    | 110 °C, 72 h  | 0,11    | 0,52                   | vysoká   | 0,34                   | střední  |
| 6 - 2%  | 54    | 50 °C, 72 h   | 1,16    | 0,18                   | nízká    | 0,09                   | nízká    |
| 6 - 10% | 21    | -             | 0,92    | 0,15                   | nízká    | 0,09                   | nízká    |
| 6 - 10% | 28    | 50 °C, 48 h   | 0,31    | 0,36                   | střední  | 0,20                   | střední  |
| 6 - 10% | 36    | 110 °C, 72 h  | 0,11    | 0,37                   | střední  | 0,23                   | střední  |
| 6 - 10% | 54    | 50 °C, 72 h   | 0,68    | 0,16                   | nízká    | 0,09                   | nízká    |

Tabulka B: Měření vzduchové propustnosti na dlaždicích z 29. 10. 2009 a 30. 10. 2009 po 5, resp. 6 týdnech (měřila Ing. Kucharczyková Barbora, PhD.)

| Vzorek  | Datum výroby | Datum zkoušení | Stáří betonu | VLHKOST | TPT                                  |        |      |                                      |                             |
|---------|--------------|----------------|--------------|---------|--------------------------------------|--------|------|--------------------------------------|-----------------------------|
|         |              |                |              | $w$     | $k_T$                                | $P_i$  | $L$  | $k_{T,3}$                            | Kvalita krycí vrstva betonu |
|         |              |                |              | [%]     | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] | [mbar] | [mm] | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                             |
| O1 - 2% | 30. 10. 2009 | 5. 12. 2009    | 5            | 4,6     | 0,011                                | 23     | 7,1  | 0,044                                | dobrá                       |
| O2 - 2% |              |                |              | 4,4     | 0,009                                | 22     | 6,4  | 0,030                                | dobrá                       |
| O3 - 2% |              |                |              | 4,2     | 0,025                                | 24     | 10,7 | 0,070                                | dobrá                       |
| O4 - 2% |              | 11. 12. 2009   | 6            | 4,5     | 0,022                                | 25     | 10,2 | 0,080                                | dobrá                       |
| O5 - 2% |              |                |              | 4,4     | 0,015                                | 24     | 8,4  | 0,050                                | dobrá                       |
| O6 - 2% |              |                |              | 4,5     | 0,022                                | 25     | 10,0 | 0,080                                | dobrá                       |
| Ø       |              |                |              | 4,4     | 0,017                                | 24     | 8,8  | 0,059                                | dobrá                       |

|          |              |              |   |     |       |    |      |       |         |
|----------|--------------|--------------|---|-----|-------|----|------|-------|---------|
| P1 - 10% | 29. 10. 2009 | 5. 12. 2009  | 5 | 4,0 | 0,104 | 31 | 22,0 | 0,246 | střední |
| P2 - 10% |              |              |   | 3,8 | 0,063 | 30 | 17,2 | 0,126 | střední |
| P3 - 10% |              |              |   | 4,2 | 0,073 | 28 | 18,3 | 0,205 | střední |
| P4 - 10% |              | 11. 12. 2009 | 6 | 4,0 | 0,076 | 30 | 18,8 | 0,180 | střední |
| P5 - 10% |              |              |   | 3,9 | 0,130 | 32 | 24,5 | 0,282 | střední |
| P6 - 10% |              |              |   | 3,8 | 0,119 | 31 | 23,4 | 0,237 | střední |
| Ø        |              |              |   | 4,0 | 0,094 | 30 | 20,7 | 0,213 | střední |

Tabulka C: Měření vzduchové propustnosti na dlaždicích z 30. 5. 2009, měřeno 1. 12. 2009, tj. po 6 měsících (měřila Ing. Kucharczyková Barbora, PhD.)

| Vzorek | Datum výroby | Datum zkoušení | Stáří betonu | VLHKOST | TPT                                 |        |      |                                      |                             |
|--------|--------------|----------------|--------------|---------|-------------------------------------|--------|------|--------------------------------------|-----------------------------|
|        |              |                |              | $w$     | $k_T$                               | $P_i$  | $L$  | $k_{T,3}$                            | Kvalita krycí vrstva betonu |
|        |              |                |              | [%]     | [*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> ] | [mbar] | [mm] | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                             |
| 1      | 30. 5. 2009  | 1. 12. 2009    | 6 měsíců     | 4,4     | 0,318                               | 39     | 38,4 | 1,063                                | špatná                      |
| 2      |              |                |              | 4,4     | 0,339                               | 39     | 39,6 | 1,133                                | špatná                      |
| 3      |              |                |              | 4,0     | 0,197                               | 35     | 30,1 | 0,466                                | střední                     |
| 4      |              |                |              | 4,1     | 0,396                               | 41     | 42,7 | 1,022                                | špatná                      |
| 5      |              |                |              | 4,2     | 0,092                               | 30     | 20,6 | 0,259                                | střední                     |
| 6      |              |                |              | 4,1     | 0,455                               | 42     | 45,8 | 1,174                                | špatná                      |
| Ø      |              |                |              | 4,2     | 0,300                               | 38     | 36,2 | 0,853                                | střední                     |

Tabulka D: Měření vzduchové propustnosti a počáteční povrchové absorpce na dlaždicích s datem výroby 30. 5. 2009 a datem zkoušení 1. 12. 2011

| Vzorek | Stáří | VLHKOST | TPT                                 |                  |         | ISAT                   |                  |                        |                  |
|--------|-------|---------|-------------------------------------|------------------|---------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
|        |       | w       | k <sub>T</sub>                      | k <sub>T;3</sub> | vrstva  | ISA <sub>10 min</sub>  |                  | ISA <sub>30 min</sub>  |                  |
|        | [rok] | [%]     | [·10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |         | [ml/m <sup>2</sup> /s] | třída<br>absorp. | [ml/m <sup>2</sup> /s] | třída<br>absorp. |
| 1/4    | 2,5   | 1,42    | 1,146                               | 0,294            | střední | 0,10                   | nízká            | 0,05                   | nízká            |
| 2/3    |       | 1,12    | 2,800                               | 0,554            | střední | 0,07                   | nízká            | 0,07                   | nízká            |
| 3/4    |       | 0,98    | 1,641                               | 0,286            | střední | 0,23                   | nízká            | 0,13                   | nízká            |
| 4/4    |       | 0,98    | 2,235                               | 0,390            | střední | 0,14                   | nízká            | 0,11                   | nízká            |
| 5/3    |       | 1,45    | 0,756                               | 0,199            | střední | 0,06                   | nízká            | 0,05                   | nízká            |
| 6/4    |       | 0,83    | 1,892                               | 0,290            | střední | 0,11                   | nízká            | 0,08                   | nízká            |
| Ø      |       | 1,13    | 1,745                               | 0,336            | střední | 0,11                   | nízká            | 0,08                   | nízká            |

Tabulka E: Měření vzduchové a vodní propustnosti na dlaždicích s datem výroby

30. 5. 2009 a datem zkoušení 1. 12. 2011

| Vzorek | Stáří | VLHKOST | GWT                           |                                        | TPT                           |                               |                             |
|--------|-------|---------|-------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|        |       | $w$     | $k_1$                         | $k_1 < 1.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ | $k_T$                         | $k_{T3}$                      | Kvalita krycí vrstvy betonu |
|        | [rok] | [%]     | $[\cdot 10^{-6} \text{ m}^2]$ |                                        | $[\cdot 10^{-6} \text{ m}^2]$ | $[\cdot 10^{-6} \text{ m}^2]$ |                             |
| 1/2    | 2,5   | 1,16    | 8,362                         | NE                                     | 1,227                         | 0,251                         | střední                     |
| 1/3    |       | 1,32    | 12,216                        | NE                                     | 2,022                         | 0,475                         | střední                     |
| 2/1    |       | 1,32    | 14,772                        | NE                                     | 1,348                         | 0,317                         | střední                     |
| 2/2    |       | 1,50    | 11,961                        | NE                                     | 1,816                         | 0,498                         | střední                     |
| 3/2    |       | 1,16    | 11,887                        | NE                                     | 1,545                         | 0,316                         | střední                     |
| 3/3    |       | 0,98    | 19,315                        | NE                                     | 2,129                         | 0,372                         | střední                     |
| 4/2    |       | 1,40    | 12,776                        | NE                                     | 0,900                         | 0,227                         | střední                     |
| 4/3    |       | 1,00    | 8,829                         | NE                                     | 1,745                         | 0,311                         | střední                     |
| 5/2    |       | 1,64    | 5,223                         | NE                                     | 1,597                         | 0,495                         | střední                     |
| 5/4    |       | 1,80    | 3,093                         | NE                                     | 0,710                         | 0,252                         | střední                     |
| 6/2    |       | 0,88    | 12,886                        | NE                                     | 1,957                         | 0,313                         | střední                     |
| 6/3    |       | 0,71    | 16,789                        | NE                                     | 2,443                         | 0,339                         | střední                     |
| Ø      |       | 1,24    | 11,509                        | NE                                     | 1,619                         | 0,347                         | střední                     |

**Příloha č. 2 – Výsledky experimentálního měření GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech**

Tabulka F: Měření součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a povrchové hmotností vlhkosti  $w$  na dlaždicích ve stáří 2 až 90 dní

| Stáří | VLHKOST                         | TPT                                     |                                |                            |                                   |                                    |
|-------|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|       | Povrchová hmotností vlhkost $w$ | Součinitel vzduchové propustnosti $k_T$ | Kvalita povrchové vrstvy $k_T$ | Hloubka vniknutí vakua $L$ | Přepočet na 3 % vlhkost $k_{T,3}$ | Kvalita povrchové vrstvy $k_{T,3}$ |
| [dny] | [%]                             | $[*10^{-16} \text{m}^2]$                | -                              | [mm]                       | $[*10^{-16} \text{m}^2]$          | -                                  |
| 2     | 0,22                            | 5,509                                   | 4 – špatná                     | 97                         | 0,502                             | 3 – střední                        |
| 3     | 0,62                            | 1,709                                   | 4 – špatná                     | 57                         | 0,220                             | 3 – střední                        |
| 7     | 0,60                            | 0,682                                   | 3 – střední                    | 48                         | 0,086                             | 2 – dobrá                          |
| 14    | 0,92                            | 0,534                                   | 3 – střední                    | 48                         | 0,089                             | 2 – dobrá                          |
| 28    | 0,80                            | 0,354                                   | 3 – střední                    | 39                         | 0,053                             | 2 – dobrá                          |
| 90    | 0,92                            | 0,082                                   | 2 – dobrá                      | 29                         | 0,014                             | 2 – dobrá                          |

Tabulka G: Měření vodní propustnosti metodou GWT a povrchové hmotností vlhkosti  $w$  na dlaždicích ve stáří 2 až 90 dní

| Stáří | VLHKOST | GWT                      |                                                                                        |
|-------|---------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|       | $w$     | $k_1$                    | Dle DIN 1045 je trvanlivý beton, když je $k_1 < 1.0 * 10^{-16} \text{m}^2$ . Souhlasí? |
| [dny] | [%]     | $[*10^{-16} \text{m}^2]$ |                                                                                        |
| 2     | 0,22    | 64,35                    | ne                                                                                     |
| 3     | 0,62    | 41,43                    | ne                                                                                     |
| 7     | 0,60    | 39,36                    | ne                                                                                     |
| 14    | 0,92    | 38,31                    | ne                                                                                     |
| 28    | 0,80    | 32,45                    | ne                                                                                     |
| 90    | 0,92    | 27,55                    | ne                                                                                     |



Tabulka H: Výsledky počáteční povrchové absorpce stanovené přístrojem ISAT a hodnoty povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$

| Stáří | VLHKOST | ISAT                   |          |                        |          |                        |          |
|-------|---------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|
|       | $w$     | $ISA_{10\ min}$        |          | $ISA_{30\ min}$        |          | $ISA_{60\ min}$        |          |
| [dny] | [%]     | [ml/m <sup>2</sup> /s] | absorpce | [ml/m <sup>2</sup> /s] | absorpce | [ml/m <sup>2</sup> /s] | absorpce |
| 2     | 0,22    | 0,54                   | vysoká   | 0,41                   | vysoká   | 0,27                   | vysoká   |
| 3     | 0,62    | 0,41                   | střední  | 0,19                   | střední  | 0,17                   | střední  |
| 7     | 0,60    | 0,43                   | střední  | 0,27                   | střední  | 0,19                   | střední  |
| 14    | 0,92    | 0,42                   | střední  | 0,23                   | střední  | 0,14                   | střední  |
| 28    | 0,80    | 0,32                   | střední  | 0,18                   | střední  | 0,11                   | střední  |
| 90    | 0,92    | 0,20                   | nízká    | 0,11                   | nízká    | 0,07                   | nízká    |

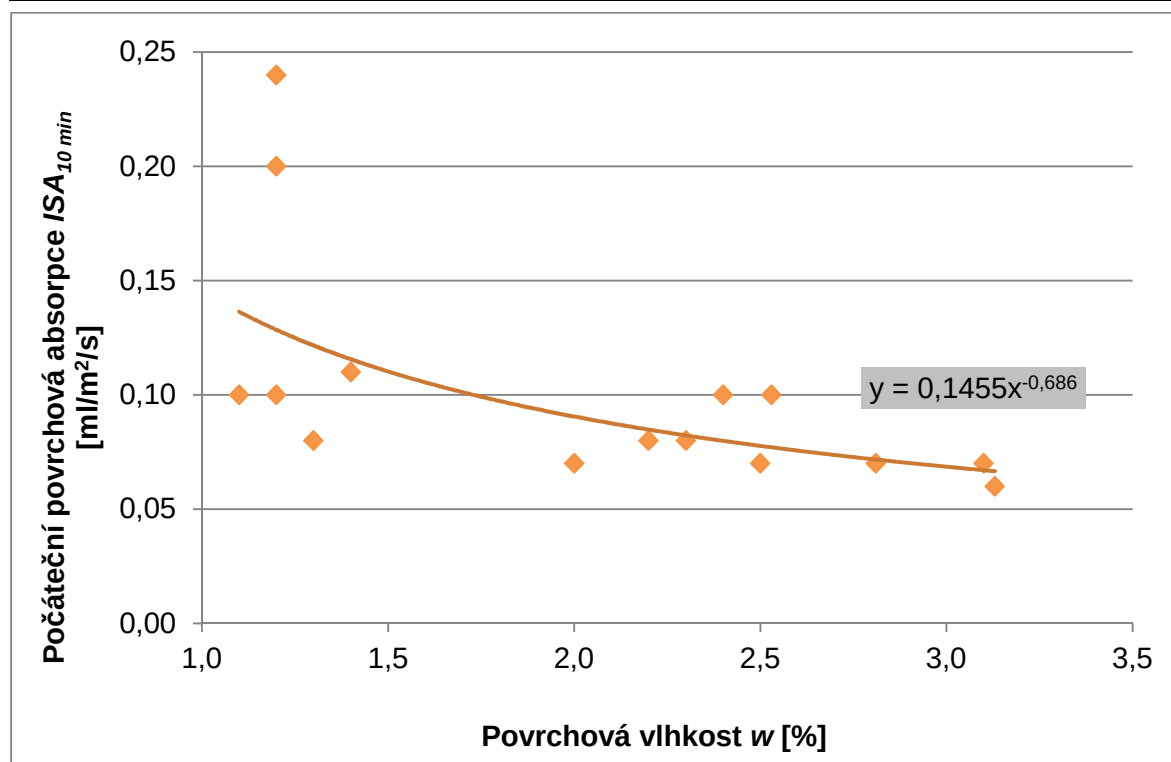
**Příloha č. 3 – Výsledky experimentálního měření FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny**

Tabulka I: Naměřené hodnoty povrchové vlhkosti, TPT a GWT; stáří 28 dní

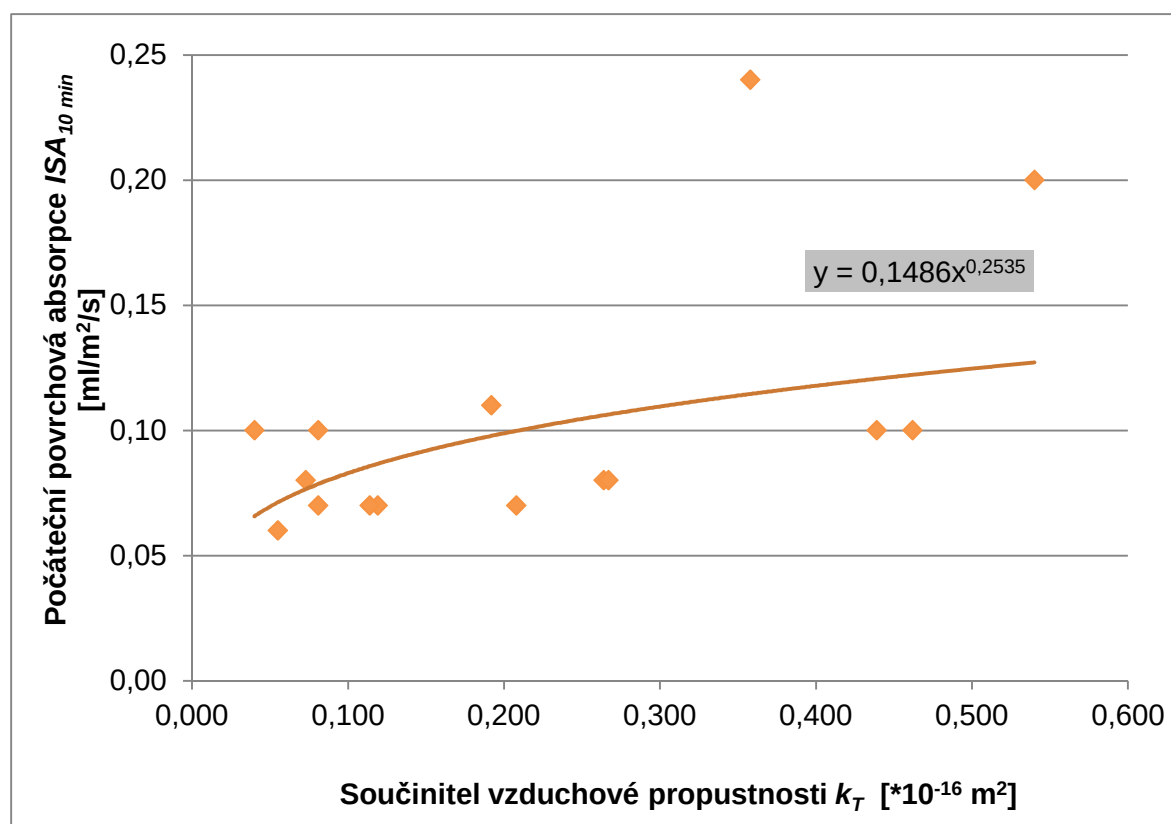
| plocha nebedněná | VLHKOST              | TPT                      |                              |                             | GWT                             |                                                                                  |
|------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                  | Odhad hmot. vlhkosti | Součinitel propustnosti  | Přepočet $k_T$ na 3% vlhkost | Kvalita krycí vrstvy betonu | Součinitel vnitřní propustnosti | Dle DIN 1045 lze za TRVANLIVÝ BETON považovat beton, kdy součinitel propustnosti |
|                  | $w$                  | $k_T$                    | $k_{T3}$                     |                             | $k_1$                           |                                                                                  |
|                  | [%]                  | $[*10^{-16} \text{m}^2]$ | $[*10^{-16} \text{m}^2]$     |                             | $[*10^{-16} \text{m}^2]$        |                                                                                  |
| 1                | 2,8                  | 0,074                    | 0,062                        | 2 - dobrá                   | 2,97                            | NE                                                                               |
| 2                | 2,9                  | 0,088                    | 0,077                        | 2 - dobrá                   | 1,17                            | NE                                                                               |
| 3                | 2,8                  | 0,112                    | 0,095                        | 2 - dobrá                   | 0,41                            | ANO                                                                              |
| 4                | 2,6                  | 0,040                    | 0,027                        | 2 - dobrá                   | 2,19                            | NE                                                                               |
| 5                | 2,8                  | 0,055                    | 0,062                        | 2 - dobrá                   | 2,23                            | NE                                                                               |
| 6                | 2,3                  | 0,114                    | 0,097                        | 2 - dobrá                   | 2,47                            | NE                                                                               |
| 7                | 1,2                  | 0,140                    | 0,029                        | 2 - dobrá                   | 30,98                           | NE                                                                               |
| 8                | 1,2                  | 1,064                    | 0,231                        | 3 - střední                 | 88,27                           | NE                                                                               |
| 9                | 1,7                  | 0,222                    | 0,072                        | 2 - dobrá                   | 20,47                           | NE                                                                               |
| 10               | 1,4                  | 0,460                    | 0,115                        | 3 - střední                 | 64,50                           | NE                                                                               |
| 11               | 1,4                  | 0,478                    | 0,117                        | 3 - střední                 | 71,56                           | NE                                                                               |
| 12               | 1,3                  | 0,464                    | 0,111                        | 3 - střední                 | 52,31                           | NE                                                                               |
| 13               | 2,4                  | 0,492                    | 0,123                        | 3 - střední                 | 3,14                            | NE                                                                               |
| 14               | 2,3                  | 0,559                    | 0,354                        | 3 - střední                 | 5,76                            | NE                                                                               |
| 15               | 2,5                  | 0,501                    | 0,262                        | 3 - střední                 | 2,47                            | NE                                                                               |
| Ø                | 2,0                  |                          | 0,122                        | 3 - střední                 | 23,39                           | NE                                                                               |

Tabulka J: Měření povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  a počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10\ min}$  a  $ISA_{30\ min}$  ve stáří 28 dní

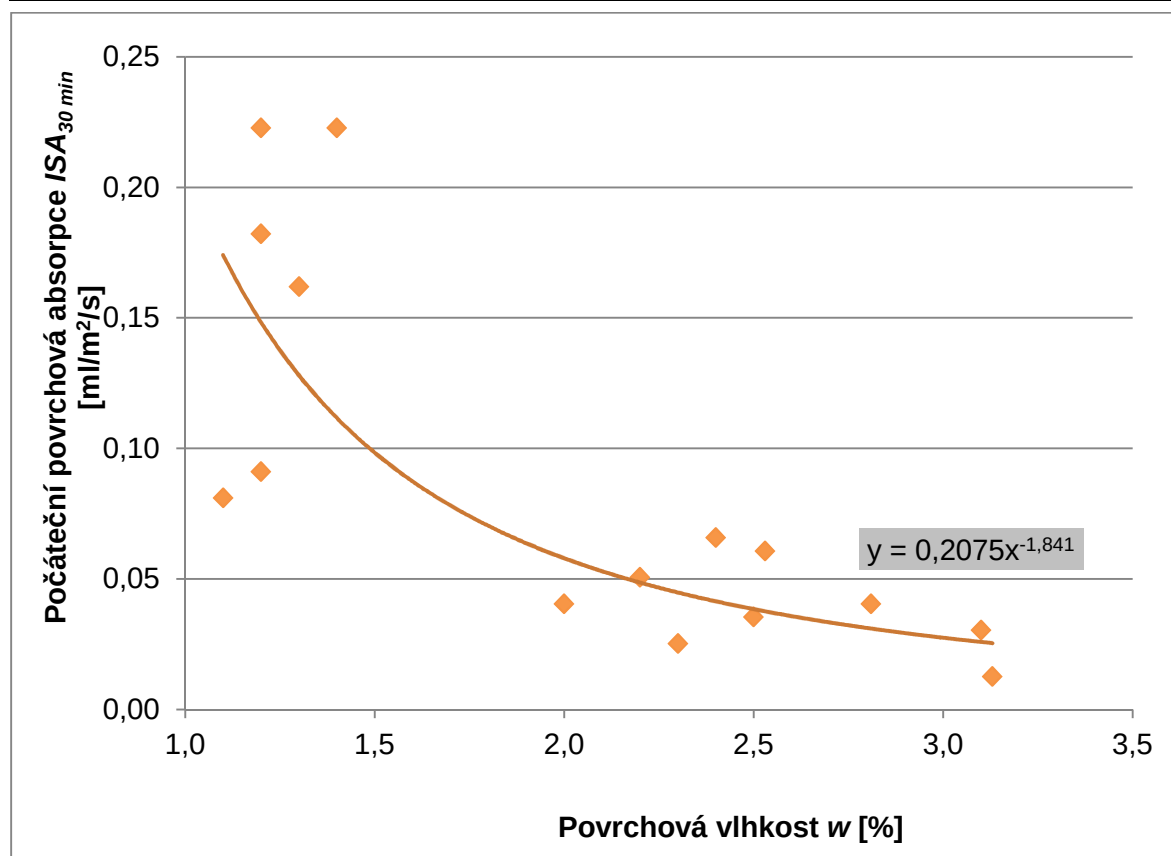
| plocha nebedněná | VLHKOST                        | TPT                        |                                    |                                      | ISAT             |                 |                 |
|------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|                  | odhad<br>hmotnost.<br>vlhkosti | součinitel<br>propustnosti | přepočet<br>$k_T$ na 3%<br>vlhkost | kvalita<br>krycí<br>vrstvy<br>betonu | $ISA_{10\ min}$  | $ISA_{30\ min}$ | $ISA_{60\ min}$ |
|                  |                                |                            |                                    |                                      | absorpce „nízká“ |                 |                 |
|                  |                                |                            |                                    |                                      | < 0,25           | < 0,17          | < 0,10          |
|                  |                                |                            |                                    |                                      | [ml/m²/s]        |                 |                 |
| 1                | 2,5                            | 0,119                      | 0,077                              | dobrá                                | 0,07             | 0,04            | 0,03            |
| 2                | 2,3                            | 0,073                      | 0,040                              | dobrá                                | 0,08             | 0,03            | 0,03            |
| 3                | 3,1                            | 0,081                      | 0,091                              | dobrá                                | 0,07             | 0,03            | 0,02            |
| 4                | 2,5                            | 0,040                      | 0,027                              | dobrá                                | 0,10             | 0,06            | 0,04            |
| 5                | 3,1                            | 0,055                      | 0,062                              | dobrá                                | 0,06             | 0,01            | 0,02            |
| 6                | 2,8                            | 0,114                      | 0,097                              | dobrá                                | 0,07             | 0,04            | 0,04            |
| 7                | 1,1                            | 0,439                      | 0,082                              | dobrá                                | 0,10             | 0,08            | 0,03            |
| 8                | 1,2                            | 0,540                      | 0,115                              | střední                              | 0,20             | 0,18            | 0,09            |
| 9                | 1,2                            | 0,081                      | 0,018                              | dobrá                                | 0,10             | 0,09            | 0,03            |
| 10               | 1,2                            | 0,358                      | 0,078                              | dobrá                                | 0,24             | 0,22            | 0,07            |
| 11               | 1,3                            | 0,264                      | 0,060                              | dobrá                                | 0,08             | 0,16            | 0,06            |
| 12               | 1,4                            | 0,192                      | 0,047                              | dobrá                                | 0,11             | 0,22            | 0,07            |
| 13               | 2,2                            | 0,267                      | 0,133                              | střední                              | 0,08             | 0,05            | 0,05            |
| 14               | 2,4                            | 0,462                      | 0,264                              | střední                              | 0,10             | 0,07            | 0,05            |
| 15               | 2,0                            | 0,208                      | 0,088                              | dobrá                                | 0,07             | 0,04            | 0,03            |
| Ø                | 2,0                            |                            | 0,085                              | dobrá                                | 0,10             | 0,09            | 0,04            |



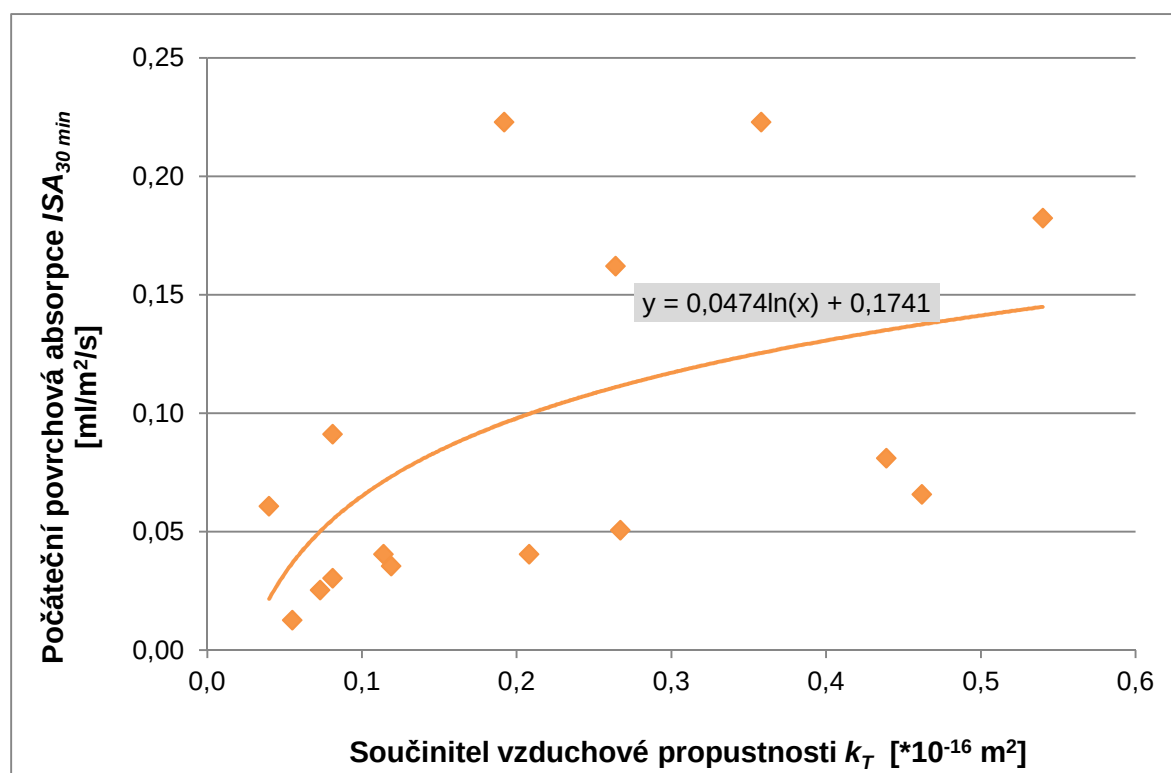
Obrázek A: Závislost počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  na povrchové vlhkosti  $w$



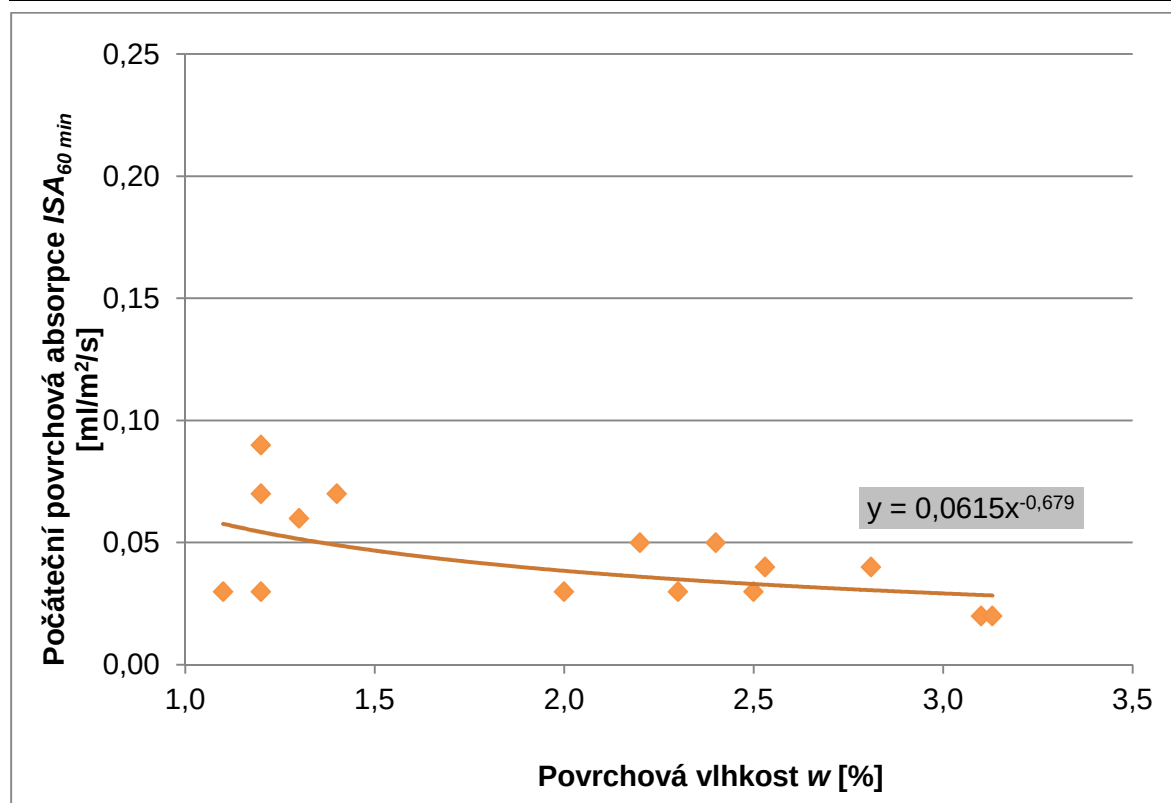
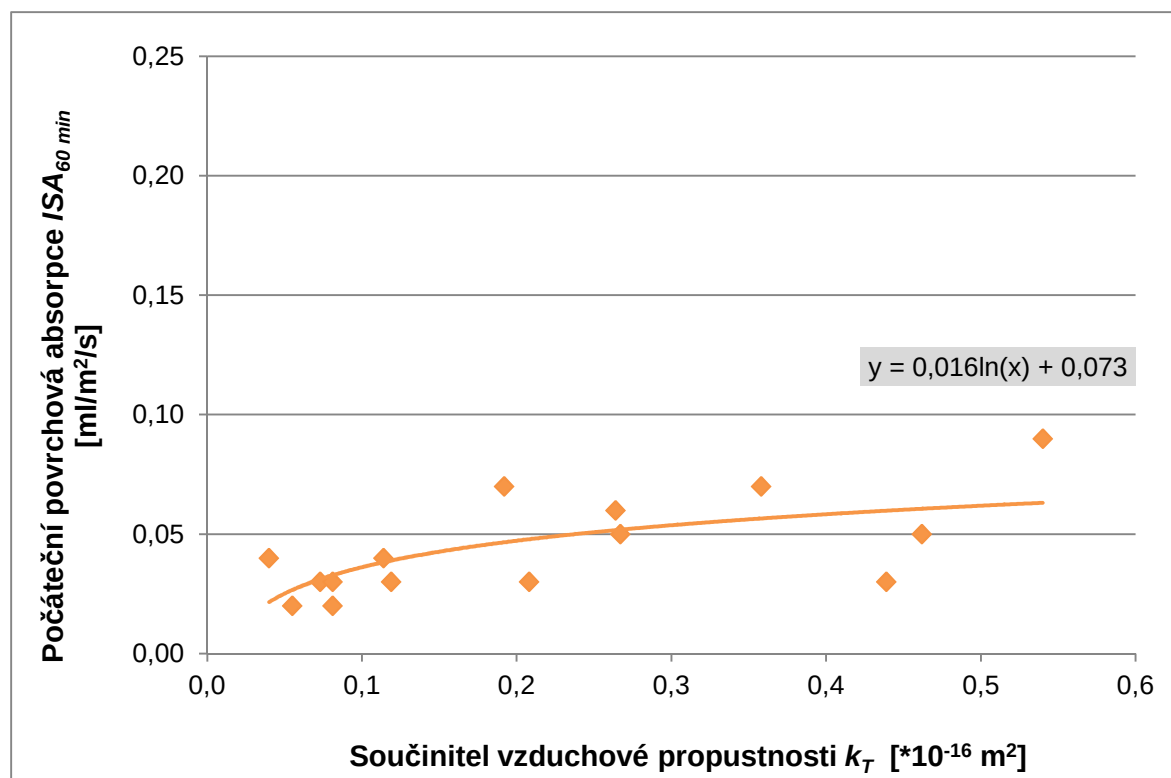
Obrázek B: Závislost počáteční povrchové absorpce  $ISA_{10 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$



Obrázek C: Závislost počáteční povrchové absorpce  $ISA_{30 \text{ min}}$  na povrchové vlhkosti  $w$



Obrázek D: Závislost počáteční povrchové absorpce  $ISA_{30 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$

Obrázek E: Závislost počáteční povrchové absorpce  $ISA_{60 \text{ min}}$  na povrchové vlhkosti  $w$ Obrázek F: Závislost počáteční povrchové absorpce  $ISA_{60 \text{ min}}$  na součiniteli vzduchové propustnosti  $k_T$

Tabulka K: Měření povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  a součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  pro  $v/c = 0,65$  ve stáří 28 dní

| směs       | VLHKOST | TPT                       |        |      |                           |                             |
|------------|---------|---------------------------|--------|------|---------------------------|-----------------------------|
| $v/c=0,65$ | $w$     | $k_T$                     | $Pi$   | $L$  | $k_{T3}$                  | kvalita krycí vrstvy betonu |
|            | [%]     | $[*10^{-16} \text{ m}^2]$ | [mbar] | [mm] | $[*10^{-16} \text{ m}^2]$ |                             |
| referenční | 3,2     | 0,229                     | 70     | 31   | 0,272                     | střední                     |
| Stavon     | 2,7     | 0,108                     | 83     | 22   | 0,083                     | dobrá                       |
| Econo-Net  | 3,4     | 0,161                     | 77     | 24,1 | 0,227                     | střední                     |

Tabulka L: Měření povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  a součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  pro  $v/c = 0,55$  ve stáří 28 dní

| směs       | VLHKOST | TPT                       |        |      |                           |                             |
|------------|---------|---------------------------|--------|------|---------------------------|-----------------------------|
| $v/c=0,55$ | $w$     | $k_T$                     | $Pi$   | $L$  | $k_{T3}$                  | kvalita krycí vrstvy betonu |
|            | [%]     | $[*10^{-16} \text{ m}^2]$ | [mbar] | [mm] | $[*10^{-16} \text{ m}^2]$ |                             |
| referenční | 2,6     | 0,356                     | 72     | 28,6 | 0,252                     | střední                     |
| Stavon     | 2,8     | 0,097                     | 101    | 21   | 0,082                     | dobrá                       |
| Econo-Net  | 2,4     | 0,306                     | 126    | 36   | 0,182                     | střední                     |

Tabulka M: Měření povrchové hmotnostní vlhkosti  $w$  a součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  pro  $v/c = 0,45$  ve stáří 28 dní

| směs       | VLHKOST | TPT                       |        |      |                           |                             |
|------------|---------|---------------------------|--------|------|---------------------------|-----------------------------|
| $v/c=0,45$ | $w$     | $k_T$                     | $Pi$   | $L$  | $k_{T3}$                  | kvalita krycí vrstvy betonu |
|            | [%]     | $[*10^{-16} \text{ m}^2]$ | [mbar] | [mm] | $[*10^{-16} \text{ m}^2]$ |                             |
| referenční | 2,7     | 0,255                     | 74     | 15,8 | 0,197                     | střední                     |
| Stavon     | 2,8     | 0,082                     | 83     | 14   | 0,069                     | dobrá                       |
| Econo-Net  | 2,5     | 0,151                     | 79     | 26,2 | 0,098                     | dobrá                       |

**Příloha č. 4 – Výsledky experimentálního měření FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti**

Tabulka N – část 1: Měření povrchové vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a počáteční povrchové absorpce metodou ISAT, stáří 2 roky

| Č. měření | Datum výroby / zkoušení | Stáří | VLHKOST | TPT                                   |                  |                | ISAT                              |       |                       |       |
|-----------|-------------------------|-------|---------|---------------------------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|-------|-----------------------|-------|
|           |                         |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub> | Kvalita vrstvy | ISA <sub>10 min</sub>             |       | ISA <sub>30 min</sub> |       |
|           |                         |       | [%]     | [* 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |                | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |       |                       |       |
| 1         | 27.7.2010 / 27.9.2012   | 2     | 1,80    | 0,333                                 | 0,118            | střední        | 0,06                              | nízká | 0,04                  | nízká |
| 2         |                         |       | 1,75    | 0,436                                 | 0,148            | střední        | 0,10                              | nízká | 0,05                  | nízká |
| 3         |                         |       | 1,88    | 0,536                                 | 0,204            | střední        | 0,09                              | nízká | 0,05                  | nízká |
| 4         |                         |       | 1,78    | 0,427                                 | 0,149            | střední        | 0,06                              | nízká | 0,04                  | nízká |
| 5         |                         |       | 1,70    | 0,899                                 | 0,293            | střední        | 0,10                              | nízká | 0,07                  | nízká |
| 6         |                         |       | 1,70    | 0,585                                 | 0,191            | střední        | 0,07                              | nízká | 0,04                  | nízká |
| 7         |                         |       | 1,80    | 0,795                                 | 0,283            | střední        | 0,09                              | nízká | 0,06                  | nízká |
| 8         |                         |       | 1,73    | 0,569                                 | 0,190            | střední        | 0,08                              | nízká | 0,04                  | nízká |
| 9         |                         |       | 0,73    | 1,348                                 | 0,190            | střední        | 0,10                              | nízká | 0,07                  | nízká |
| 10        |                         |       | 0,73    | 1,260                                 | 0,178            | střední        | 0,07                              | nízká | 0,07                  | nízká |
| 11        |                         |       | 0,73    | 1,088                                 | 0,154            | střední        | 0,09                              | nízká | 0,08                  | nízká |
| 12        |                         |       | 0,71    | 1,632                                 | 0,227            | střední        | 0,16                              | nízká | 0,11                  | nízká |
| 13        |                         |       | 1,16    | 1,24                                  | 0,254            | střední        | 0,12                              | nízká | 0,09                  | nízká |
| 14        |                         |       | 1,03    | 1,996                                 | 0,365            | střední        | 0,17                              | nízká | 0,10                  | nízká |
| 15        |                         |       | 1,22    | 0,926                                 | 0,200            | střední        | 0,11                              | nízká | 0,08                  | nízká |
| 16        |                         |       | 1,42    | 0,951                                 | 0,244            | střední        | 0,11                              | nízká | 0,06                  | nízká |
| 17        |                         |       | 1,45    | 1,101                                 | 0,289            | střední        | 0,15                              | nízká | 0,08                  | nízká |
| 18        |                         |       | 1,55    | 0,739                                 | 0,212            | střední        | 0,14                              | nízká | 0,10                  | nízká |
| 19        |                         |       | 1,50    | 1,417                                 | 0,389            | střední        | 0,12                              | nízká | 0,08                  | nízká |
| 20        |                         |       | 1,50    | 0,901                                 | 0,247            | střední        | 0,13                              | nízká | 0,07                  | nízká |
| 21        |                         |       | 1,78    | 0,732                                 | 0,255            | střední        | 0,06                              | nízká | 0,04                  | nízká |
| 22        |                         |       | 1,67    | 1,119                                 | 0,356            | střední        | 0,07                              | nízká | 0,05                  | nízká |



Tabulka N – část 2: Měření povrchové vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a počáteční povrchové absorpce metodou ISAT, stáří 2 roky

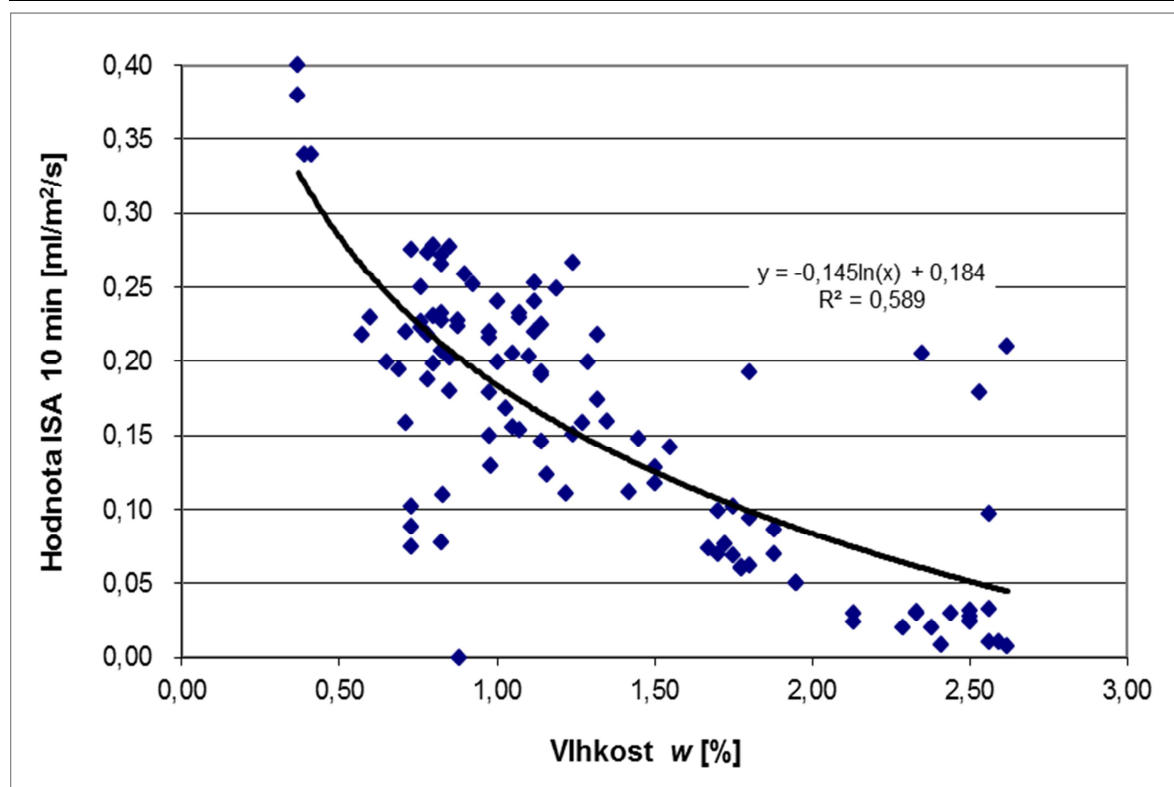
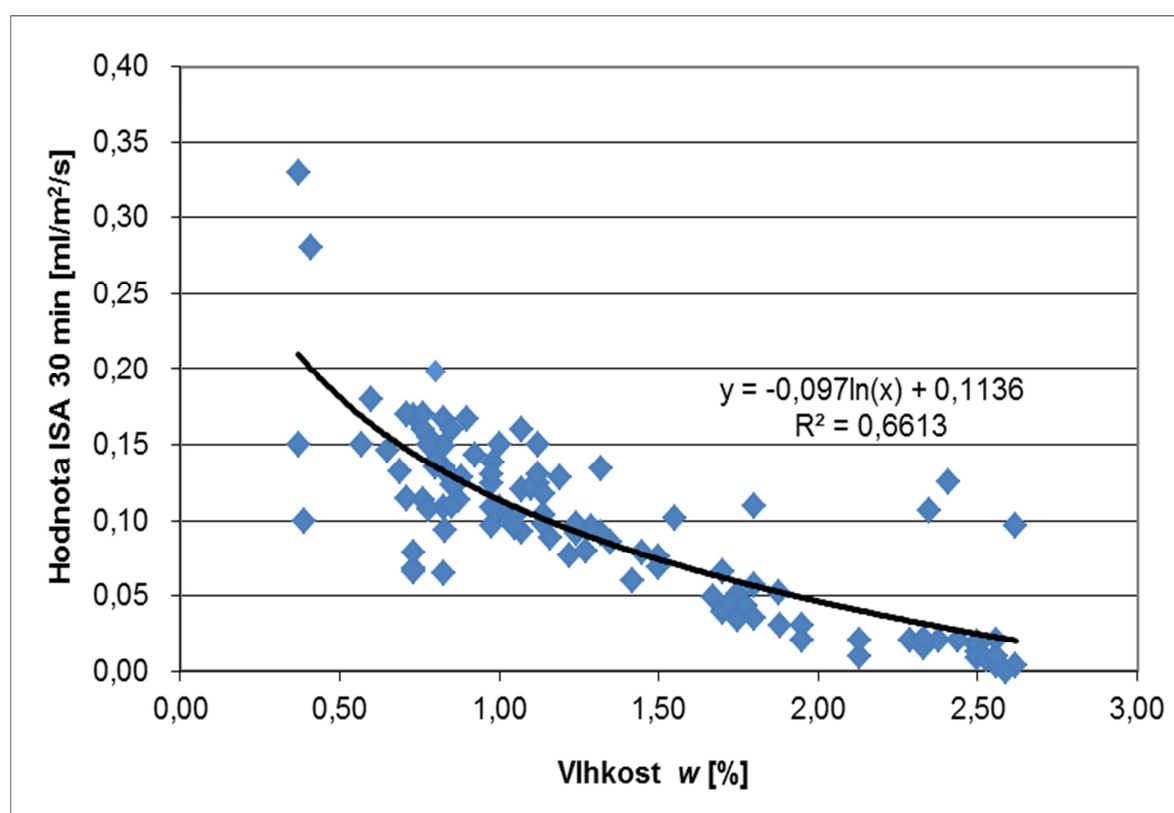
| Č. měření | Datum výroby / zkoušení | Stáří | VLHKOST | TPT                                   |                  |                | ISAT                              |         |                       |         |
|-----------|-------------------------|-------|---------|---------------------------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                         |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub> | Kvalita vrstvy | ISA <sub>10 min</sub>             |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                         | [rok] | [%]     | [* 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |                | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |
| 23        | 5.8.2010 / 7.9.2012     | 2     | 1,80    | 1,262                                 | 0,231            | střední        | 0,19                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 24        |                         |       | 0,83    | 1,553                                 | 0,238            | střední        | 0,27                              | střední | 0,15                  | nízká   |
| 25        |                         |       | 1,05    | 0,968                                 | 0,180            | střední        | 0,21                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 26        |                         |       | 0,88    | 1,367                                 | 0,219            | střední        | 0,23                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 27        |                         |       | 0,83    | 1,139                                 | 0,175            | střední        | 0,23                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 28        |                         |       | 0,88    | 0,949                                 | 0,152            | střední        | 0,22                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 29        |                         |       | 0,83    | 1,378                                 | 0,211            | střední        | 0,23                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 30        |                         |       | 0,73    | 1,949                                 | 0,275            | střední        | 0,28                              | střední | 0,17                  | střední |
| 31        |                         |       | 1,19    | 0,919                                 | 0,193            | střední        | 0,25                              | střední | 0,13                  | nízká   |
| 32        |                         |       | 1,14    | 0,998                                 | 0,201            | střední        | 0,22                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 33        |                         |       | 1,12    | 1,052                                 | 0,208            | střední        | 0,25                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 34        |                         |       | 1,07    | 1,385                                 | 0,262            | střední        | 0,23                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 35        |                         |       | 1,35    | 0,6                                   | 0,145            | střední        | 0,16                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 36        |                         |       | 1,27    | 0,794                                 | 0,179            | střední        | 0,16                              | nízká   | 0,08                  | nízká   |
| 37        |                         |       | 1,32    | 0,78                                  | 0,183            | střední        | 0,17                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 38        |                         |       | 1,29    | 0,85                                  | 0,195            | střední        | 0,20                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 39        |                         |       | 1,14    | 0,883                                 | 0,178            | střední        | 0,19                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 40        |                         |       | 1,00    | 0,834                                 | 0,149            | střední        | 0,20                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 41        |                         |       | 0,98    | 0,612                                 | 0,107            | střední        | 0,15                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 42        |                         |       | 1,10    | 0,681                                 | 0,132            | střední        | 0,20                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 43        |                         |       | 0,76    | 1,061                                 | 0,154            | střední        | 0,23                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 44        |                         |       | 0,78    | 1,344                                 | 0,198            | střední        | 0,27                              | střední | 0,16                  | nízká   |
| 45        |                         |       | 0,83    | 0,694                                 | 0,106            | střední        | 0,21                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 46        |                         |       | 0,78    | 0,872                                 | 0,129            | střední        | 0,19                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 47        | 1.11.2010 / 5.11.2012   | 2     | 2,56    | 0,157                                 | 0,107            | střední        | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 48        |                         |       | 2,50    | 0,368                                 | 0,239            | střední        | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 49        |                         |       | 2,50    | 9,359                                 | 6,082            | špatná         | 0,03                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 50        |                         |       | 2,33    | 0,698                                 | 0,392            | střední        | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 51        |                         |       | 2,50    | 0,129                                 | 0,084            | dobrá          | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 52        |                         |       | 2,50    | 0,026                                 | 0,017            | dobrá          | 0,02                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |

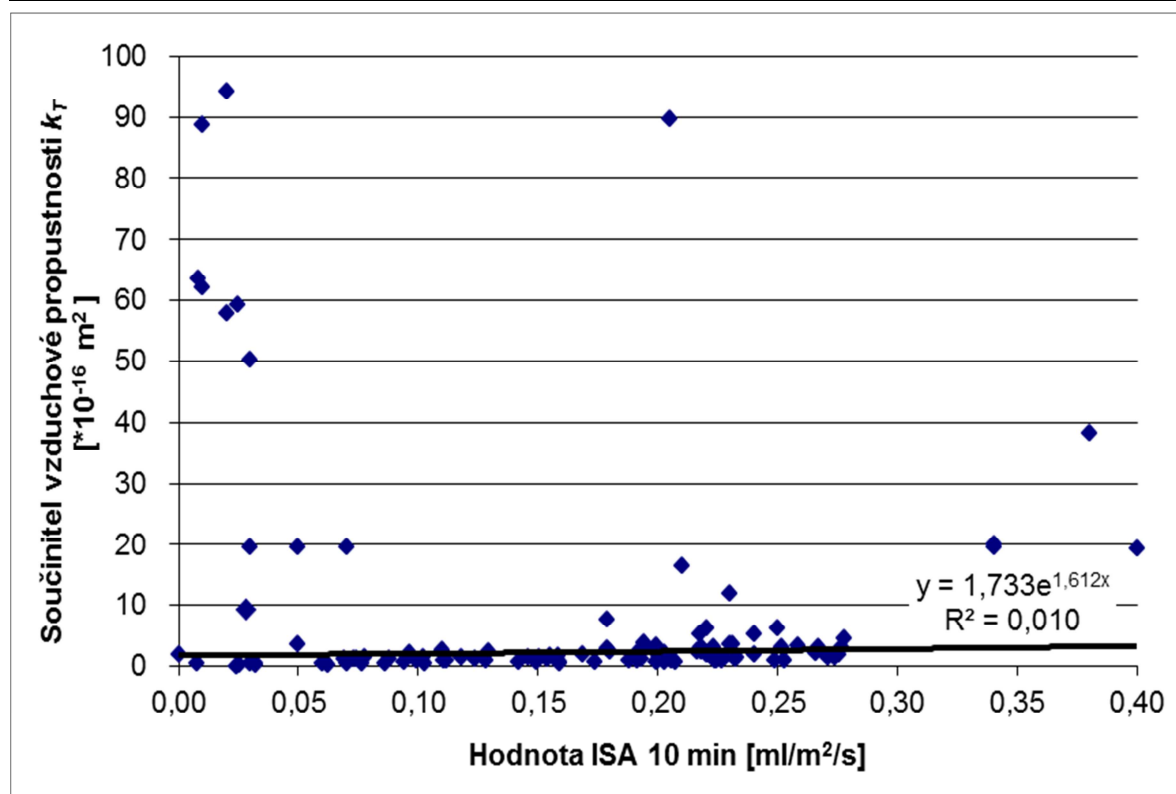
Tabulka N – část 3: Měření povrchové vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a počáteční povrchové absorpce metodou ISAT, stáří 2 roky

| Č. měření | Datum<br>výroby /<br>zkoušení | Stáří | VLHKOST | TPT                                   |                  |                   | ISAT                              |         |                       |         |
|-----------|-------------------------------|-------|---------|---------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                               |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub> | Kvalita<br>vrstvy | ISA <sub>10 min</sub>             |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                               |       | [%]     | [* 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |                   | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |
| 53        | 8. 11. 2010 / 25. 11. 2012    | 2     | 1,14    | 2,544                                 | 0,512            | střední           | 0,19                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 54        |                               |       | 0,98    | 2,461                                 | 0,430            | střední           | 0,22                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 55        |                               |       | 0,98    | 2,458                                 | 0,431            | střední           | 0,13                              | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 56        |                               |       | 1,32    | 2,437                                 | 0,573            | střední           | 0,22                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 57        |                               |       | 0,83    | 2,093                                 | 0,321            | střední           | 0,27                              | střední | 0,17                  | střední |
| 58        |                               |       | 0,85    | 3,001                                 | 0,470            | střední           | 0,28                              | střední | 0,16                  | nízká   |
| 59        |                               |       | 0,93    | 3,052                                 | 0,510            | střední           | 0,25                              | střední | 0,14                  | nízká   |
| 60        |                               |       | 0,98    | 1,966                                 | 0,343            | střední           | 0,22                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 61        |                               |       | 0,90    | 3,289                                 | 0,538            | střední           | 0,26                              | střední | 0,17                  | střední |
| 62        |                               |       | 0,80    | 2,685                                 | 0,403            | střední           | 0,20                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 63        |                               |       | 0,76    | 3,082                                 | 0,447            | střední           | 0,22                              | nízká   | 0,16                  | nízká   |
| 64        |                               |       | 0,80    | 3,576                                 | 0,537            | střední           | 0,23                              | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 65        | 15. 11. 2010 / 17. 11. 2012   | 2     | 2,56    | 2,127                                 | 1,456            | špatná            | 0,10                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 66        |                               |       | 2,53    | 7,657                                 | 5,106            | špatná            | 0,18                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 67        |                               |       | 2,62    | 0,481                                 | 0,347            | střední           | 0,01                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 68        |                               |       | 2,41    | 63,71                                 | 38,312           | velmi<br>špatná   | 0,01                              | střední | 0,13                  | nízká   |
| 69        |                               |       | 2,62    | 16,4                                  | 11,819           |                   | 0,21                              | střední | 0,10                  | nízká   |
| 70        |                               |       | 2,35    | 89,68                                 | 51,211           | velmi<br>špatná   | 0,20                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 71        |                               |       | 2,13    | 59,310                                | 28,018           |                   | 0,02                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 72        |                               |       | 2,29    | 57,75                                 | 31,315           | velmi<br>špatná   | 0,02                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 73        |                               |       | 2,59    | 62,260                                | 43,724           |                   | 0,01                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 74        |                               |       | 2,56    | 88,750                                | 60,736           | velmi<br>špatná   | 0,01                              | nízká   | 0,01                  | nízká   |
| 75        |                               |       | 2,44    | 50,290                                | 31,034           |                   | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 76        |                               |       | 2,38    | 94,260                                | 55,236           |                   | 0,02                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 77        | 8. 12. 2010 / 25. 11. 2012    | 2     | 0,65    | 3,428                                 | 0,452            | střední           | 0,20                              | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 78        |                               |       | 0,57    | 5,35                                  | 0,659            | střední           | 0,22                              | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 79        |                               |       | 0,78    | 3,074                                 | 0,454            | střední           | 0,22                              | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 80        |                               |       | 0,98    | 2,841                                 | 0,496            | střední           | 0,18                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 81        |                               |       | 1,14    | 1,442                                 | 0,290            | střední           | 0,15                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 82        |                               |       | 1,07    | 1,209                                 | 0,229            | střední           | 0,15                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 83        |                               |       | 1,05    | 1,743                                 | 0,325            | střední           | 0,16                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |

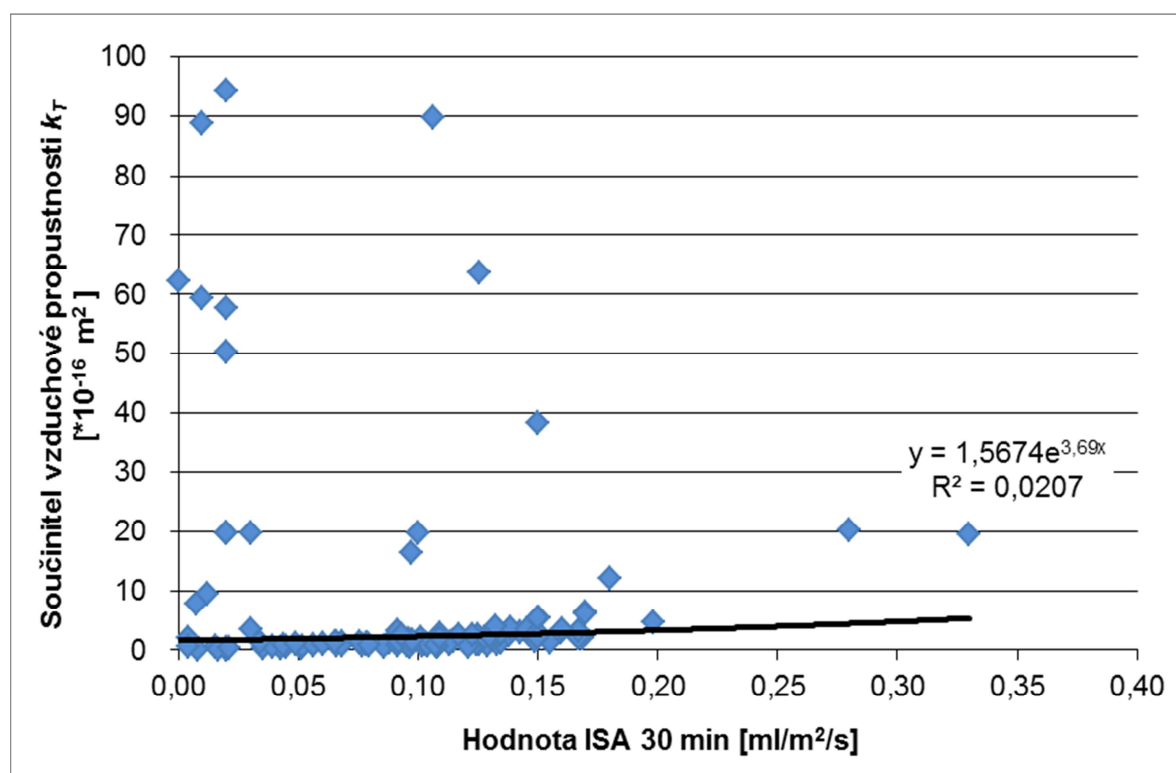
Tabulka N – část 4: Měření povrchové vlhkosti  $w$ , součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  metodou TPT a počáteční povrchové absorpce metodou ISAT, stáří 2 roky

| Č. měření | Datum výroby / zkoušení  | Stáří | VLHKOST | TPT                                   |                  |                | ISAT                              |         |                       |         |
|-----------|--------------------------|-------|---------|---------------------------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                          |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub> | Kvalita vrstvy | ISA <sub>10 min</sub>             |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                          | [rok] | [%]     | [* 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |                | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |
| 84        | 8. 12. 2010 / 25.11.2012 | 2     | 1,24    | 3,147                                 | 0,690            | střední        | 0,27                              | střední | 0,09                  | nízká   |
| 85        |                          |       | 1,24    | 1,543                                 | 0,338            | střední        | 0,15                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 86        |                          |       | 0,85    | 2,121                                 | 0,332            | střední        | 0,20                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 87        |                          |       | 0,88    | 1,986                                 | 0,319            | střední        | 0,10                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 88        |                          |       | 0,41    | 20,16                                 | 2,162            | špatná         | 0,34                              | střední | 0,28                  | střední |
| 89        |                          |       | 0,37    | 38,300                                | 3,969            | špatná         | 0,38                              | střední | 0,15                  | nízká   |
| 90        |                          |       | 0,37    | 19,45                                 | 2,015            | špatná         | 0,40                              | střední | 0,33                  | střední |
| 91        |                          |       | 0,39    | 19,660                                | 2,073            | špatná         | 0,34                              | střední | 0,10                  | nízká   |
| 92        |                          |       | 1,12    | 2,268                                 | 0,449            | střední        | 0,22                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 93        |                          |       | 1,12    | 1,985                                 | 0,393            | střední        | 0,24                              | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 94        |                          |       | 1,07    | 3,513                                 | 0,666            | střední        | 0,23                              | nízká   | 0,16                  | nízká   |
| 95        |                          |       | 1,00    | 5,244                                 | 0,935            | střední        | 0,24                              | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 96        |                          |       | 0,60    | 12,05                                 | 1,522            | špatná         | 0,23                              | nízká   | 0,18                  | střední |
| 97        |                          |       | 0,71    | 6,330                                 | 0,879            | střední        | 0,22                              | nízká   | 0,17                  | střední |
| 98        |                          |       | 0,76    | 6,181                                 | 0,896            | střední        | 0,25                              | střední | 0,17                  | střední |
| 99        |                          |       | 0,80    | 4,660                                 | 0,700            | střední        | 0,28                              | střední | 0,20                  | střední |
| 100       |                          |       | 1,88    | 19,690                                | 7,485            | špatná         | 0,07                              | nízká   | 0,03                  | nízká   |
| 101       |                          |       | 2,13    | 19,600                                | 9,259            | špatná         | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 102       |                          |       | 1,95    | 3,508                                 | 1,419            | špatná         | 0,05                              | nízká   | 0,03                  | nízká   |
| 103       |                          |       | 1,95    | 19,600                                | 7,928            | špatná         | 0,05                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 104       | 8. 4. 2010 / 8. 5. 2012  | 2     | 0,85    | 2,458                                 | 0,385            | střední        | 0,18                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 105       |                          |       | 0,69    | 3,945                                 | 0,539            | střední        | 0,19                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 106       |                          |       | 0,83    | 2,522                                 | 0,388            | střední        | 0,11                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 107       |                          |       | 0,83    | 1,414                                 | 0,217            | střední        | 0,08                              | nízká   | 0,07                  | nízká   |
| 108       |                          |       | 1,75    | 1,22                                  | 0,415            | střední        | 0,07                              | nízká   | 0,03                  | nízká   |
| 110       |                          |       | 2,33    | 0,446                                 | 0,250            | střední        | 0,03                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |

Obrázek G: Závislost hodnoty  $ISA_{10 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 2 rokyObrázek H: Závislost hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 2 roky



Obrázek I: Závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na hodnotě  $ISA_{10 \text{ min}}$ ; stáří 2 roky



Obrázek J: Závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na hodnotě  $ISA_{30 \text{ min}}$ ; stáří 2 roky

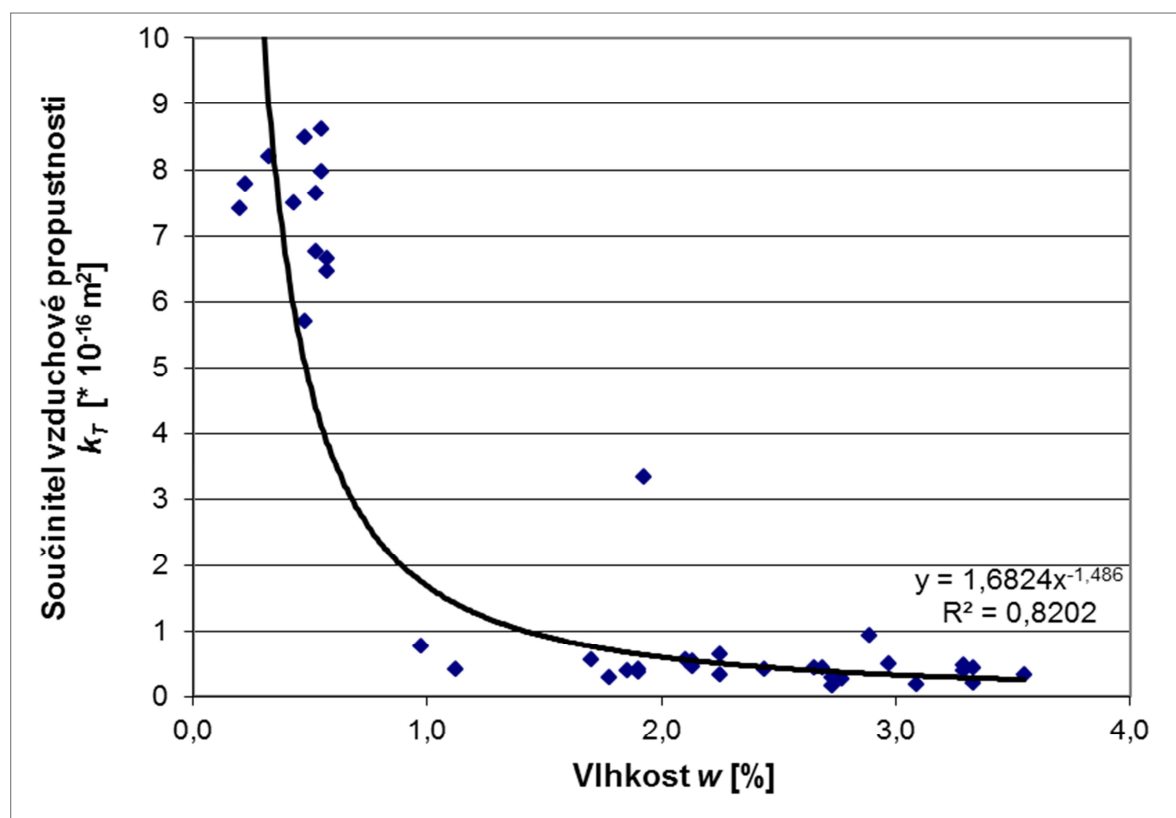
**Příloha č. 5 – Výsledky experimentálního měření FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu**

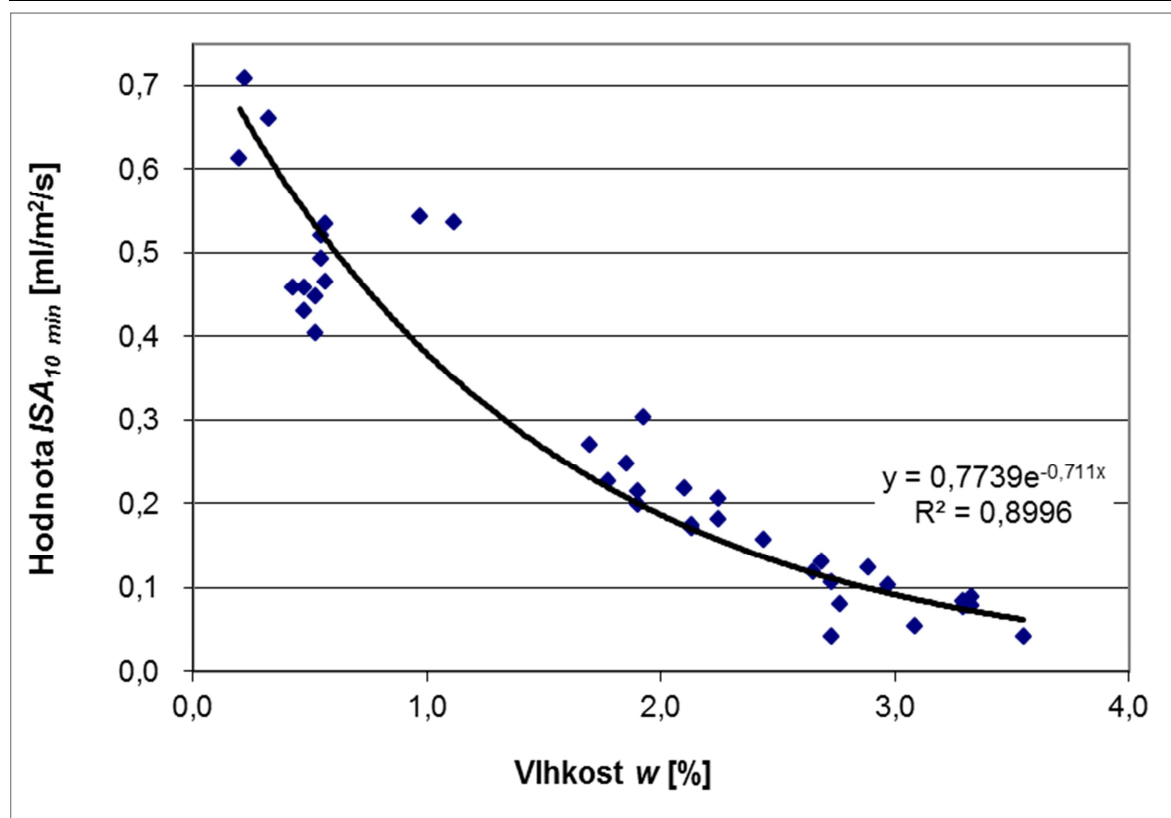
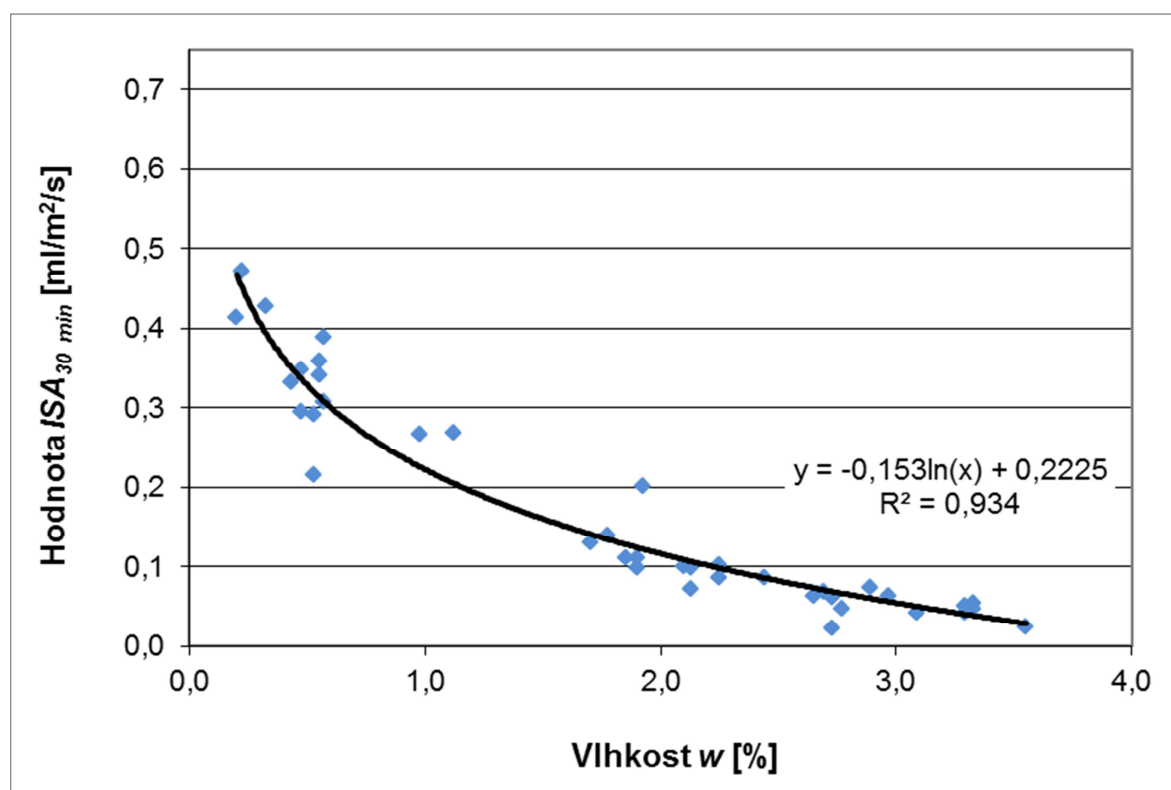
Tabulka O – část 1: Výsledky měření ve stáří 1 měsíc: vlhkost - TPT - ISAT

| Č. měření | Datum<br>výroby /<br>zkoušení | Stáří | Vlhkost | TPT                                  |                  |         | ISAT                              |         |                       |         |
|-----------|-------------------------------|-------|---------|--------------------------------------|------------------|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                               |       | w       | k <sub>T</sub>                       | k <sub>T,3</sub> | vrstva  | ISA <sub>10 min</sub>             |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                               | [dny] | [%]     | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |         | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |
| 1         | 16. 6. 2011 / 14. 7. 2011     | 28    | 2,73    | 0,174                                | 0,138            | střední | 0,04                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 2         |                               |       | 3,55    | 0,340                                | 0,546            | střední | 0,04                              | nízká   | 0,02                  | nízká   |
| 3         |                               |       | 3,09    | 0,178                                | 0,192            | střední | 0,05                              | nízká   | 0,04                  | nízká   |
| 4         |                               |       | 2,97    | 0,490                                | 0,477            | střední | 0,10                              | nízká   | 0,06                  | nízká   |
| 5         |                               |       | 2,69    | 0,443                                | 0,339            | střední | 0,13                              | nízká   | 0,07                  | nízká   |
| 6         |                               |       | 2,89    | 0,941                                | 0,856            | střední | 0,12                              | nízká   | 0,07                  | nízká   |
| 7         |                               |       | 2,73    | 0,293                                | 0,232            | střední | 0,11                              | nízká   | 0,06                  | nízká   |
| 8         |                               |       | 2,77    | 0,261                                | 0,214            | střední | 0,08                              | nízká   | 0,05                  | nízká   |
| 9         |                               |       | 2,65    | 0,436                                | 0,322            | střední | 0,12                              | nízká   | 0,06                  | nízká   |
| 10        |                               |       | 3,29    | 0,394                                | 0,506            | střední | 0,08                              | nízká   | 0,05                  | nízká   |
| 11        | 14. 7. 11 /<br>11. 8. 11      | 28    | 3,33    | 0,215                                | 0,286            | střední | 0,08                              | nízká   | 0,05                  | nízká   |
| 12        |                               |       | 3,29    | 0,479                                | 0,615            | střední | 0,08                              | nízká   | 0,04                  | nízká   |
| 13        |                               |       | 3,33    | 0,433                                | 0,575            | střední | 0,09                              | nízká   | 0,05                  | nízká   |
| 14        | 28. 7. 2011 / 25. 8. 2011     | 28    | 1,12    | 0,416                                | 0,082            | dobrá   | 0,54                              | vysoká  | 0,27                  | střední |
| 15        |                               |       | 0,98    | 0,778                                | 0,136            | střední | 0,54                              | vysoká  | 0,27                  | střední |
| 16        |                               |       | 2,10    | 0,567                                | 0,261            | střední | 0,22                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 17        |                               |       | 1,90    | 0,381                                | 0,148            | střední | 0,20                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 18        |                               |       | 2,25    | 0,323                                | 0,169            | střední | 0,18                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 19        |                               |       | 2,13    | 0,455                                | 0,215            | střední | 0,17                              | nízká   | 0,07                  | nízká   |
| 20        |                               |       | 2,25    | 0,634                                | 0,332            | střední | 0,21                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 21        |                               |       | 2,44    | 0,411                                | 0,254            | střední | 0,16                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 22        | 4. 8. 2011 / 1. 9. 2011       | 28    | 1,85    | 0,386                                | 0,144            | střední | 0,25                              | střední | 0,11                  | nízká   |
| 23        |                               |       | 1,78    | 0,299                                | 0,104            | střední | 0,23                              | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 24        |                               |       | 1,70    | 0,561                                | 0,183            | střední | 0,27                              | střední | 0,13                  | nízká   |
| 25        |                               |       | 2,13    | 0,538                                | 0,254            | střední | 0,17                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 26        |                               |       | 1,90    | 0,418                                | 0,162            | střední | 0,22                              | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 27        |                               |       | 1,93    | 3,329                                | 1,319            | špatná  | 0,30                              | střední | 0,20                  | střední |
| 28        |                               |       | 0,23    | 7,773                                | 0,711            | střední | 0,71                              | vysoká  | 0,47                  | vysoká  |
| 29        |                               |       | 0,33    | 8,196                                | 0,817            | střední | 0,66                              | vysoká  | 0,43                  | vysoká  |
| 30        |                               |       | 0,20    | 7,408                                | 0,663            | střední | 0,61                              | vysoká  | 0,41                  | vysoká  |

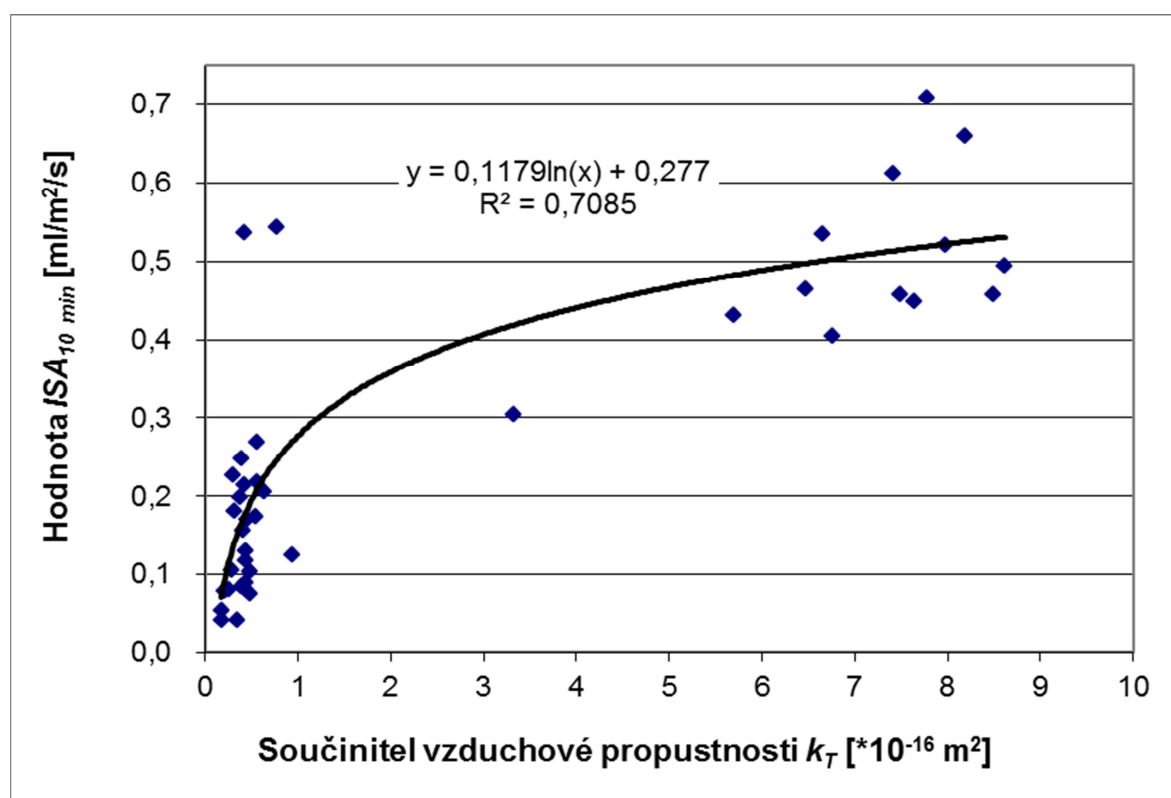
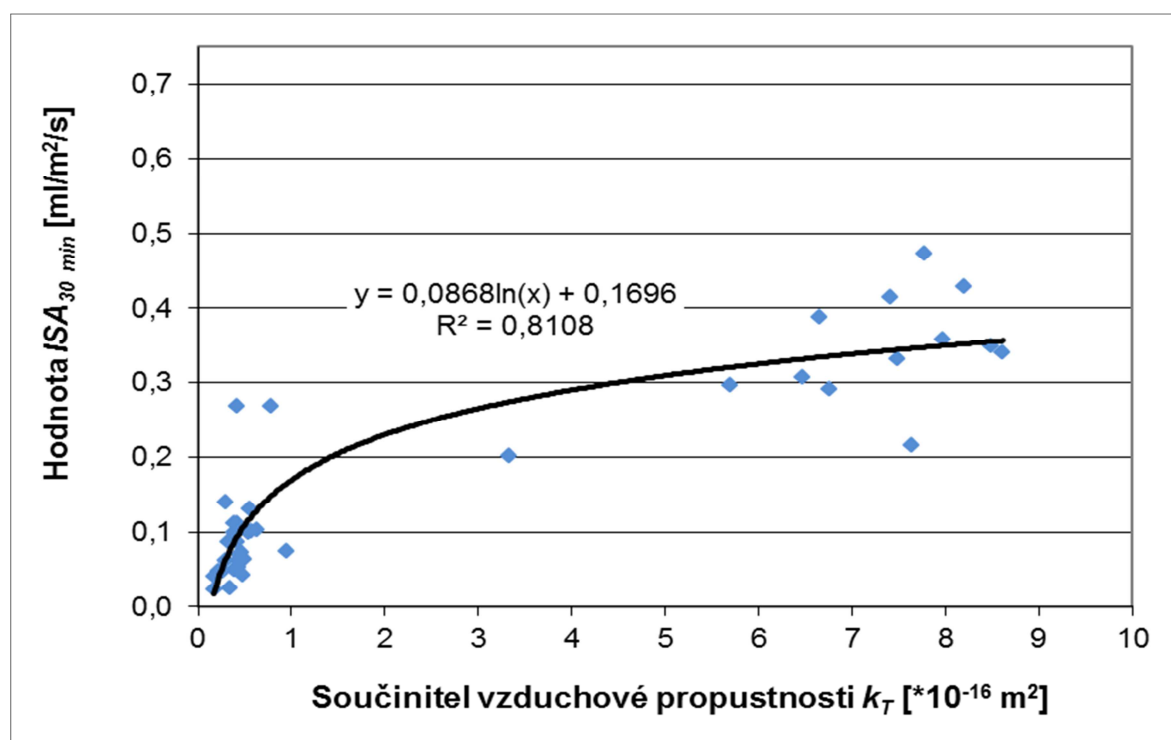
Tabulka O – část 2: Výsledky měření ve stáří 1 měsíc: vlhkost - TPT - ISAT

| Č. měření | Datum výroby / zkoušení   | Stáří | Vlhkost | TPT                                  |           |         | ISAT                              |         |                 |         |
|-----------|---------------------------|-------|---------|--------------------------------------|-----------|---------|-----------------------------------|---------|-----------------|---------|
|           |                           |       | $w$     | $k_T$                                | $k_{T,3}$ | vrstva  | $ISA_{10\ min}$                   |         | $ISA_{30\ min}$ |         |
|           |                           |       | [%]     | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |           |         | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                 |         |
| 31        | 11. 8. 2011 / 10. 9. 2011 | 30    | 0,57    | 6,473                                | 0,797     | střední | 0,47                              | střední | 0,31            | střední |
| 32        |                           |       | 0,48    | 8,489                                | 0,963     | střední | 0,46                              | střední | 0,35            | vysoká  |
| 33        |                           |       | 0,57    | 6,649                                | 0,819     | střední | 0,53                              | vysoká  | 0,39            | vysoká  |
| 34        |                           |       | 0,53    | 6,757                                | 0,800     | střední | 0,40                              | střední | 0,29            | střední |
| 35        |                           |       | 0,43    | 7,492                                | 0,818     | střední | 0,46                              | střední | 0,33            | střední |
| 36        |                           |       | 0,53    | 7,638                                | 0,905     | střední | 0,45                              | střední | 0,22            | střední |
| 37        |                           |       | 0,55    | 8,618                                | 1,043     | špatná  | 0,49                              | střední | 0,34            | střední |
| 38        |                           |       | 0,48    | 5,701                                | 0,647     | střední | 0,43                              | střední | 0,30            | střední |
| 39        |                           |       | 0,55    | 7,976                                | 0,965     | střední | 0,52                              | vysoká  | 0,36            | vysoká  |

Obrázek K: Závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc

Obrázek L: Závislost hodnoty  $ISA_{10 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsícObrázek M: Závislost hodnoty  $ISA_{30 \text{ min}}$  na vlhkosti;  $w$  stáří 1 měsíc



Obrázek N: Závislost hodnoty  $ISA_{10 \min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsícObrázek O: Závislost hodnoty  $ISA_{30 \min}$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc

Tabulka P – část 1: Měření vodní propustnosti ve stáří 1 měsíc: vlhkost - TPT - GWT

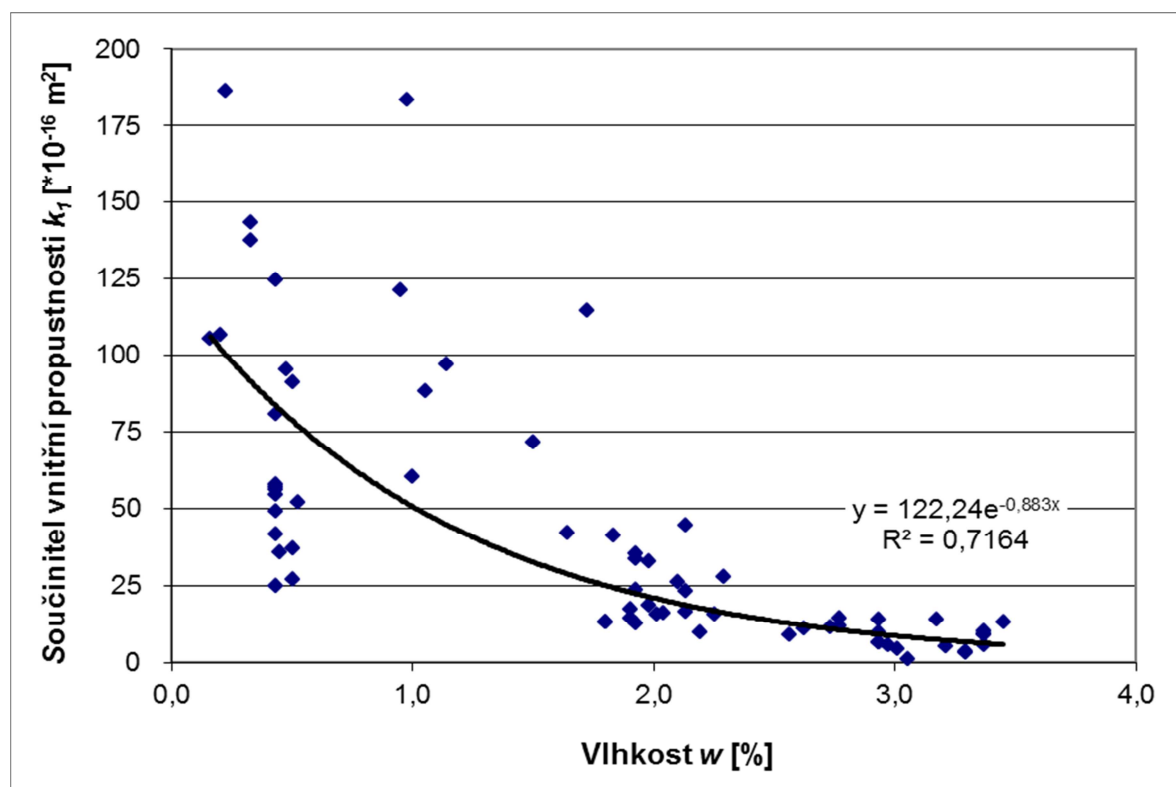
| Č. měření | Datum výroby / zkoušení   | Stáří<br>[dny] | VLHKOST | TPT                                  |                  |         | GWT                                  |                                                       |
|-----------|---------------------------|----------------|---------|--------------------------------------|------------------|---------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|           |                           |                | w       | k <sub>T</sub>                       | k <sub>T,3</sub> | vrstva  | k <sub>1</sub>                       | k <sub>1</sub> < 1.0·10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> |
|           |                           |                | [%]     | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |         | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                                                       |
| 1         | 16. 6. 2011 / 14.7 . 2011 | 28             | 2,73    | 0,375                                | 0,297            | střední | 11,307                               | ne                                                    |
| 2         |                           |                | 2,56    | 0,451                                | 0,309            | střední | 9,140                                | ne                                                    |
| 3         |                           |                | 3,45    | 0,583                                | 0,859            | střední | 13,314                               | ne                                                    |
| 4         |                           |                | 3,37    | 0,889                                | 1,223            | špatná  | 9,166                                | ne                                                    |
| 5         |                           |                | 3,05    | 0,344                                | 0,359            | střední | 1,212                                | ne                                                    |
| 6         |                           |                | 3,37    | 0,258                                | 0,355            | střední | 9,523                                | ne                                                    |
| 7         |                           |                | 3,01    | 0,421                                | 0,425            | střední | 4,587                                | ne                                                    |
| 8         |                           |                | 2,97    | 0,678                                | 0,661            | střední | 5,758                                | ne                                                    |
| 9         |                           |                | 2,93    | 0,389                                | 0,366            | střední | 6,574                                | ne                                                    |
| 10        |                           |                | 2,93    | 0,461                                | 0,434            | střední | 13,991                               | ne                                                    |
| 11        |                           |                | 2,77    | 0,629                                | 0,516            | střední | 14,251                               | ne                                                    |
| 12        |                           |                | 2,93    | 0,281                                | 0,265            | střední | 6,361                                | ne                                                    |
| 13        |                           |                | 2,93    | 0,150                                | 0,141            | střední | 10,009                               | ne                                                    |
| 14        |                           |                | 2,77    | 0,428                                | 0,351            | střední | 11,766                               | ne                                                    |
| 15        |                           |                | 2,62    | 0,649                                | 0,468            | střední | 10,876                               | ne                                                    |
| 16        |                           |                | 3,37    | 0,624                                | 0,858            | střední | 10,310                               | ne                                                    |
| 17        |                           |                | 3,37    | 0,250                                | 0,344            | střední | 5,820                                | ne                                                    |
| 18        | 28.7 . 2011 / 25.8 . 2011 | 28             | 0,98    | 0,688                                | 0,120            | střední | 183,622                              | ne                                                    |
| 19        |                           |                | 1,14    | 0,631                                | 0,127            | střední | 97,031                               | ne                                                    |
| 20        |                           |                | 1,00    | 0,762                                | 0,136            | střední | 60,379                               | ne                                                    |
| 21        |                           |                | 1,05    | 0,786                                | 0,146            | střední | 88,428                               | ne                                                    |
| 22        |                           |                | 0,95    | 2,424                                | 0,414            | střední | 121,204                              | ne                                                    |
| 23        |                           |                | 2,01    | 0,706                                | 0,301            | střední | 15,475                               | ne                                                    |
| 24        |                           |                | 2,25    | 0,699                                | 0,366            | střední | 15,833                               | ne                                                    |
| 25        |                           |                | 1,93    | 0,507                                | 0,201            | střední | 35,236                               | ne                                                    |
| 26        |                           |                | 1,90    | 0,881                                | 0,342            | střední | 14,537                               | ne                                                    |
| 27        |                           |                | 2,19    | 0,141                                | 0,070            | dobrá   | 9,868                                | ne                                                    |
| 28        |                           |                | 1,93    | 0,646                                | 0,256            | střední | 23,799                               | ne                                                    |
| 29        |                           |                | 2,13    | 0,15                                 | 0,071            | dobrá   | 16,542                               | ne                                                    |
| 30        |                           |                | 2,29    | 0,784                                | 0,425            | střední | 27,822                               | ne                                                    |
| 31        |                           |                | 2,13    | 0,673                                | 0,318            | střední | 23,023                               | ne                                                    |
| 32        |                           |                | 1,98    | 0,541                                | 0,225            | střední | 32,678                               | ne                                                    |
| 33        |                           |                | 2,10    | 0,273                                | 0,126            | střední | 26,229                               | ne                                                    |

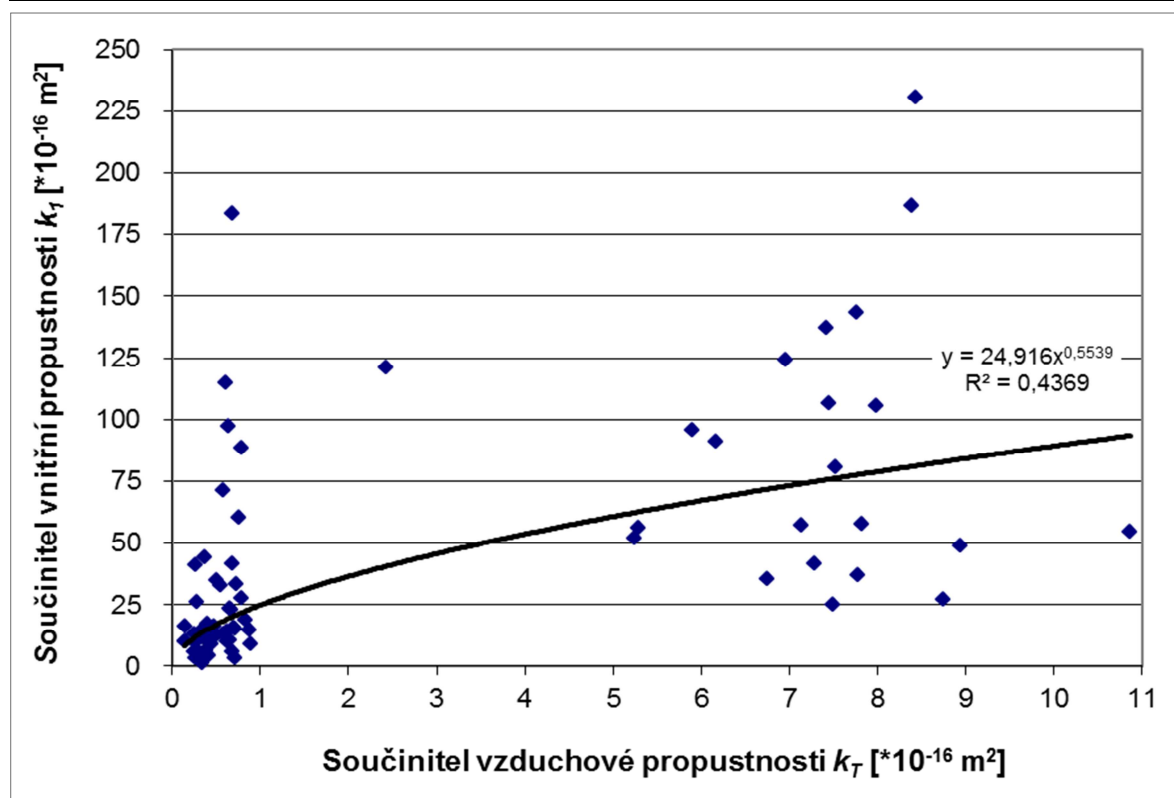
Tabulka P – část 3: Měření vodní propustnosti ve stáří 1 měsíc: vlhkost - TPT - GWT

| Č. měření | Datum výroby / zkoušení   | Stáří | VLHKOST | TPT                                  |                  |         | GWT                                  |                                        |
|-----------|---------------------------|-------|---------|--------------------------------------|------------------|---------|--------------------------------------|----------------------------------------|
|           |                           |       | w       | k <sub>T</sub>                       | k <sub>T;3</sub> | vrstva  | k <sub>1</sub>                       | k <sub>1</sub> < 1.0*10 <sup>-16</sup> |
|           |                           |       | [%]     | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |                  |         | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] | m <sup>2</sup>                         |
| 38        | 4. 8. 2011 / 1. 9. 2011   | 28    | 2,13    | 0,362                                | 0,171            | střední | 44,357                               | ne                                     |
| 39        |                           |       | 1,83    | 0,269                                | 0,098            | dobrá   | 41,277                               | ne                                     |
| 40        |                           |       | 1,80    | 0,436                                | 0,155            | střední | 13,335                               | ne                                     |
| 41        |                           |       | 1,64    | 0,676                                | 0,209            | střední | 41,852                               | ne                                     |
| 42        |                           |       | 1,50    | 0,584                                | 0,160            | střední | 71,494                               | ne                                     |
| 43        |                           |       | 1,73    | 0,604                                | 0,201            | střední | 114,700                              | ne                                     |
| 44        |                           |       | 2,04    | 0,470                                | 0,205            | střední | 16,277                               | ne                                     |
| 45        |                           |       | 1,98    | 0,833                                | 0,346            | střední | 18,706                               | ne                                     |
| 46        |                           |       | 1,90    | 0,406                                | 0,158            | střední | 17,394                               | ne                                     |
| 47        |                           |       | 1,80    | 0,244                                | 0,087            | dobrá   | 13,021                               | ne                                     |
| 48        |                           |       | 1,93    | 0,720                                | 0,285            | střední | 33,661                               | ne                                     |
| 49        |                           |       | 1,93    | 0,502                                | 0,199            | střední | 12,725                               | ne                                     |
| 50        |                           |       | 0,23    | 8,393                                | 0,767            | střední | 186,549                              | ne                                     |
| 51        |                           |       | 0,23    | 8,434                                | 0,771            | střední | 230,415                              | ne                                     |
| 52        |                           |       | 0,33    | 7,762                                | 0,774            | střední | 143,359                              | ne                                     |
| 53        |                           |       | 0,33    | 7,413                                | 0,742            | střední | 137,471                              | ne                                     |
| 54        |                           |       | 0,20    | 7,453                                | 0,667            | střední | 106,754                              | ne                                     |
| 55        |                           |       | 0,16    | 7,979                                | 0,690            | střední | 105,401                              | ne                                     |
| 56        | 11. 8. 2011 / 10. 9. 2011 | 30    | 0,43    | 6,959                                | 0,759            | střední | 124,471                              | ne                                     |
| 57        |                           |       | 0,43    | 5,294                                | 0,578            | střední | 56,209                               | ne                                     |
| 58        |                           |       | 0,50    | 6,166                                | 0,715            | střední | 91,123                               | ne                                     |
| 59        |                           |       | 0,48    | 5,897                                | 0,669            | střední | 95,515                               | ne                                     |
| 60        |                           |       | 0,43    | 7,523                                | 0,821            | střední | 80,718                               | ne                                     |
| 61        |                           |       | 0,43    | 7,287                                | 0,795            | střední | 41,727                               | ne                                     |
| 62        |                           |       | 0,43    | 7,492                                | 0,818            | střední | 24,896                               | ne                                     |
| 63        |                           |       | 0,43    | 10,86                                | 1,185            | špatná  | 54,660                               | ne                                     |
| 64        |                           |       | 0,43    | 8,941                                | 0,976            | střední | 49,251                               | ne                                     |
| 65        |                           |       | 0,43    | 7,131                                | 0,778            | střední | 57,125                               | ne                                     |
| 66        |                           |       | 0,43    | 7,827                                | 0,854            | střední | 57,917                               | ne                                     |
| 67        |                           |       | 0,45    | 6,74                                 | 0,748            | střední | 35,558                               | ne                                     |
| 68        |                           |       | 0,53    | 5,246                                | 0,621            | střední | 52,062                               | ne                                     |
| 69        |                           |       | 0,50    | 7,774                                | 0,901            | střední | 37,030                               | ne                                     |
| 70        |                           |       | 0,50    | 8,743                                | 1,013            | špatná  | 27,136                               | ne                                     |

Tabulka P – část 3: Měření vodní propustnosti ve stáří 1 měsíc: vlhkost - TPT - GWT

| Č. měření | Datum<br>výroby /<br>zkoušení | Stáří | VLHKOST | TPT                                  |           |         | GWT    |                                        |
|-----------|-------------------------------|-------|---------|--------------------------------------|-----------|---------|--------|----------------------------------------|
|           |                               |       | $w$     | $k_T$                                | $k_{T;3}$ | vrstva  | $k_1$  | $k_1 < 1.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ |
|           |                               | [dny] | [%]     | [*10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] |           |         | vrstva |                                        |
| 34        | 14. 7. 2011 /<br>12. 8. 2011  | 29    | 3,17    | 0,322                                | 0,373     | střední | 14,110 | ne                                     |
| 35        |                               |       | 3,29    | 0,27                                 | 0,347     | střední | 3,326  | ne                                     |
| 36        |                               |       | 3,21    | 0,292                                | 0,350     | střední | 5,389  | ne                                     |
| 37        |                               |       | 3,29    | 0,706                                | 0,907     | střední | 3,473  | ne                                     |

Obrázek P: Závislost součinitele  $k_1$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 měsíc



Obrázek Q: Závislost součinitele  $k_1$  na součiniteli  $k_T$ ; stáří 1 měsíc

Tabulka Q – část 1: Výsledky měření ve stáří 1 rok: vlhkost - TPT - ISAT

| Č. měření | Datum výroby / zkoušení  | Stáří | Vlhkost | TPT                                   |                                   |         | ISAT                  |         |                       |         |
|-----------|--------------------------|-------|---------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                          |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub>                  | vrstva  | ISA <sub>10 min</sub> |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                          | [rok] | [%]     | * 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |                       |         |
| 1         | 28. 7. 2011 / 9. 8. 2012 | 1     | 0,43    | 3,333                                 | 0,364                             | střední | 0,21                  | nízká   | 0,16                  | nízká   |
| 2         |                          |       | 0,45    | 2,778                                 | 0,308                             | střední | 0,22                  | nízká   | 0,17                  | nízká   |
| 3         |                          |       | 0,45    | 2,175                                 | 0,241                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,16                  | nízká   |
| 4         |                          |       | 0,53    | 2,013                                 | 0,238                             | střední | 0,30                  | střední | 0,20                  | střední |
| 5         |                          |       | 0,69    | 1,310                                 | 0,179                             | střední | 0,28                  | střední | 0,17                  | střední |
| 6         |                          |       | 0,57    | 1,839                                 | 0,226                             | střední | 0,29                  | střední | 0,18                  | střední |
| 7         |                          |       | 0,93    | 1,342                                 | 0,224                             | střední | 0,20                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 8         |                          |       | 0,85    | 1,596                                 | 0,250                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 9         |                          |       | 0,95    | 1,492                                 | 0,255                             | střední | 0,21                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 10        |                          |       | 0,98    | 1,255                                 | 0,219                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 11        |                          |       | 1,03    | 1,334                                 | 0,244                             | střední | 0,21                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 12        |                          |       | 1,24    | 1,350                                 | 0,296                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 13        |                          |       | 0,83    | 1,640                                 | 0,252                             | střední | 0,22                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 14        |                          |       | 1,80    | 1,640                                 | 0,583                             | dobrá   | 0,18                  | vysoká  | 0,11                  | nízká   |
| 15        |                          |       | 1,73    | 2,345                                 | 0,781                             | střední | 0,15                  | vysoká  | 0,08                  | nízká   |
| 16        |                          |       | 1,58    | 2,298                                 | 0,676                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 17        |                          |       | 1,75    | 2,01                                  | 0,684                             | střední | 0,15                  | nízká   | 0,08                  | nízká   |
| 18        |                          |       | 0,80    | 3,353                                 | 0,503                             | střední | 0,22                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 19        |                          |       | 0,98    | 3,394                                 | 0,592                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 20        |                          |       | 0,98    | 2,322                                 | 0,405                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 21        | 4. 8. 2011 / 23. 8. 2012 | 1     | 0,57    | 2,742                                 | 0,338                             | střední | 0,22                  | nízká   | 0,19                  | nízká   |
| 22        |                          |       | 0,55    | 2,012                                 | 0,243                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 23        |                          |       | 0,57    | 1,968                                 | 0,242                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 24        |                          |       | 0,53    | 1,433                                 | 0,170                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 25        |                          |       | 0,45    | 3,171                                 | 0,352                             | střední | 0,21                  | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 26        |                          |       | 0,48    | 2,471                                 | 0,280                             | střední | 0,25                  | střední | 0,16                  | nízká   |
| 27        |                          |       | 0,48    | 2,500                                 | 0,285                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 28        |                          |       | 0,50    | 2,252                                 | 0,261                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 29        |                          |       | 0,57    | 2,379                                 | 0,293                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 30        |                          |       | 0,67    | 1,966                                 | 0,264                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 31        |                          |       | 0,63    | 4,620                                 | 0,599                             | střední | 0,22                  | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 32        |                          |       | 0,55    | 2,546                                 | 0,308                             | střední | 0,20                  | nízká   | 0,15                  | nízká   |

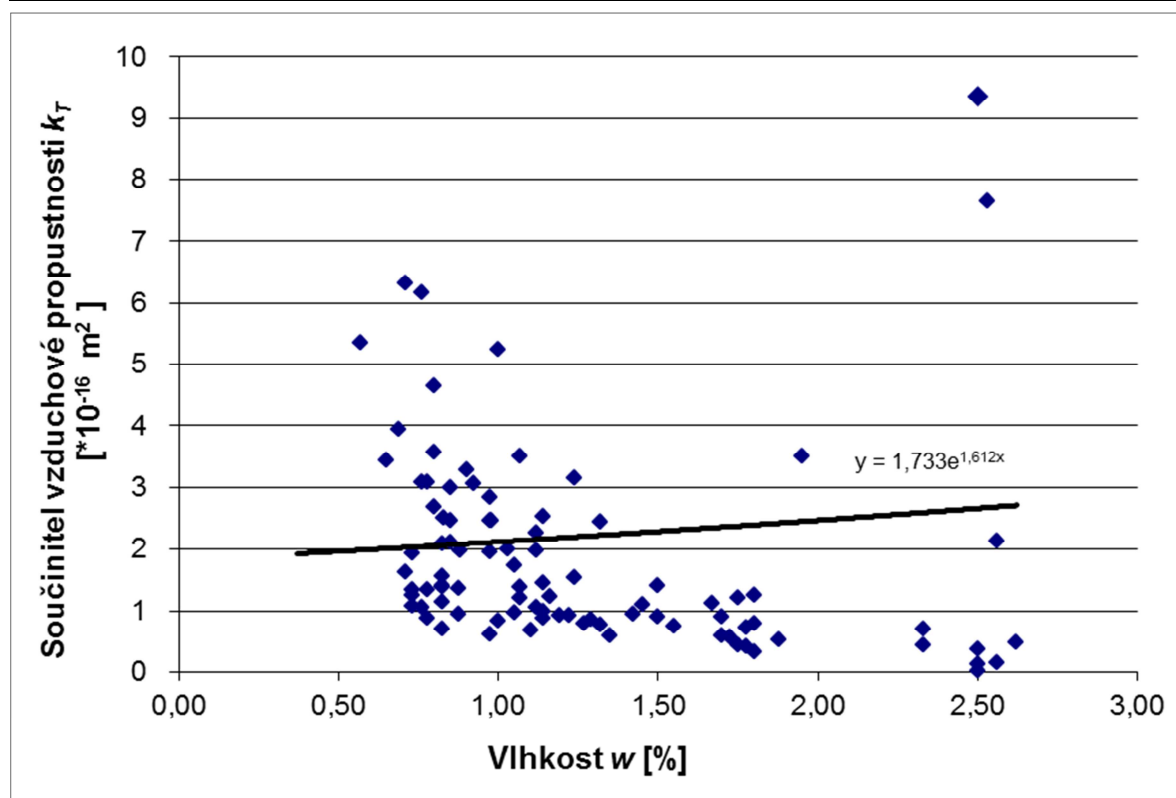
Tabulka Q – část 2: Výsledky měření ve stáří 1 rok: vlhkost - TPT - ISAT

| Č. měření | Datum<br>výroby /<br>zkoušení | Stáří | Vlhkost | TPT                                   |                                   |         | ISAT                  |         |                       |         |
|-----------|-------------------------------|-------|---------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                               |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub>                  | vrstva  | ISA <sub>10 min</sub> |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                               | [rok] | [%]     | * 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |                       |         |
| 33        | 4. 8. 2011 / 23. 8. 2012      | 1     | 0,67    | 1,983                                 | 0,266                             | střední | 0,12                  | nízká   | 0,08                  | nízká   |
| 34        |                               |       | 0,63    | 2,619                                 | 0,338                             | střední | 0,21                  | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 35        |                               |       | 0,67    | 3,49                                  | 0,468                             | střední | 0,24                  | nízká   | 0,16                  | nízká   |
| 36        |                               |       | 0,65    | 2,754                                 | 0,363                             | střední | 0,24                  | nízká   | 0,17                  | nízká   |
| 37        |                               |       | 0,28    | 4,349                                 | 0,398                             | střední | 0,28                  | střední | 0,23                  | střední |
| 38        |                               |       | 0,30    | 7,241                                 | 0,665                             | střední | 0,40                  | střední | 0,29                  | střední |
| 39        |                               |       | 1,75    | 8,726                                 | 0,801                             | střední | 0,42                  | střední | 0,30                  | střední |
| 40        |                               |       | 0,30    | 7,007                                 | 1,160                             | špatná  | 0,29                  | střední | 0,20                  | střední |
| 41        |                               |       | 0,35    | 5,077                                 | 0,987                             | střední | 0,27                  | střední | 0,21                  | střední |
| 42        |                               |       | 0,28    | 4,100                                 | 0,615                             | střední | 0,29                  | střední | 0,22                  | střední |
| 43        |                               |       | 0,30    | 3,449                                 | 0,744                             | střední | 0,36                  | střední | 0,25                  | střední |
| 44        | 16. 6. 2011 / 21. 8. 2012     | 1     | 1,50    | 3,94                                  | 1,080                             | špatná  | 0,16                  | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 45        |                               |       | 1,73    | 1,35                                  | 0,448                             | střední | 0,11                  | nízká   | 0,06                  | nízká   |
| 46        |                               |       | 1,16    | 4,59                                  | 0,941                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 47        |                               |       | 1,32    | 1,76                                  | 0,414                             | střední | 0,12                  | nízká   | 0,07                  | nízká   |
| 48        |                               |       | 1,24    | 7,14                                  | 1,566                             | špatná  | 0,21                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 49        |                               |       | 1,42    | 1,90                                  | 0,487                             | střední | 0,18                  | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 50        |                               |       | 1,29    | 2,13                                  | 0,487                             | střední | 0,17                  | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 51        |                               |       | 0,88    | 1,92                                  | 0,308                             | střední | 0,24                  | nízká   | 0,18                  | střední |
| 52        |                               |       | 1,14    | 6,01                                  | 1,210                             | špatná  | 0,20                  | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 53        |                               |       | 1,22    | 6,33                                  | 1,365                             | špatná  | 0,19                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 54        |                               |       | 1,00    | 3,67                                  | 0,655                             | střední | 0,21                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 55        |                               |       | 1,14    | 5,85                                  | 1,178                             | špatná  | 0,20                  | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 56        |                               |       | 0,85    | 3,48                                  | 0,545                             | střední | 0,26                  | střední | 0,16                  | nízká   |
| 57        |                               |       | 0,80    | 3,78                                  | 0,567                             | střední | 0,29                  | střední | 0,16                  | nízká   |
| 58        |                               |       | 1,12    | 2,68                                  | 0,530                             | střední | 0,23                  | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 59        |                               |       | 0,88    | 4,58                                  | 0,733                             | střední | 0,28                  | střední | 0,16                  | nízká   |
| 60        |                               |       | 1,10    | 4,18                                  | 0,812                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,11                  | nízká   |
| 61        |                               |       | 1,38    | 3,29                                  | 0,811                             | střední | 0,15                  | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 62        |                               |       | 1,10    | 2,39                                  | 0,464                             | střední | 0,19                  | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 63        |                               |       | 1,78    | 2,53                                  | 0,879                             | střední | 0,13                  | nízká   | 0,08                  | nízká   |
| 64        |                               |       | 0,88    | 7,25                                  | 1,160                             | špatná  | 0,24                  | nízká   | 0,14                  | nízká   |

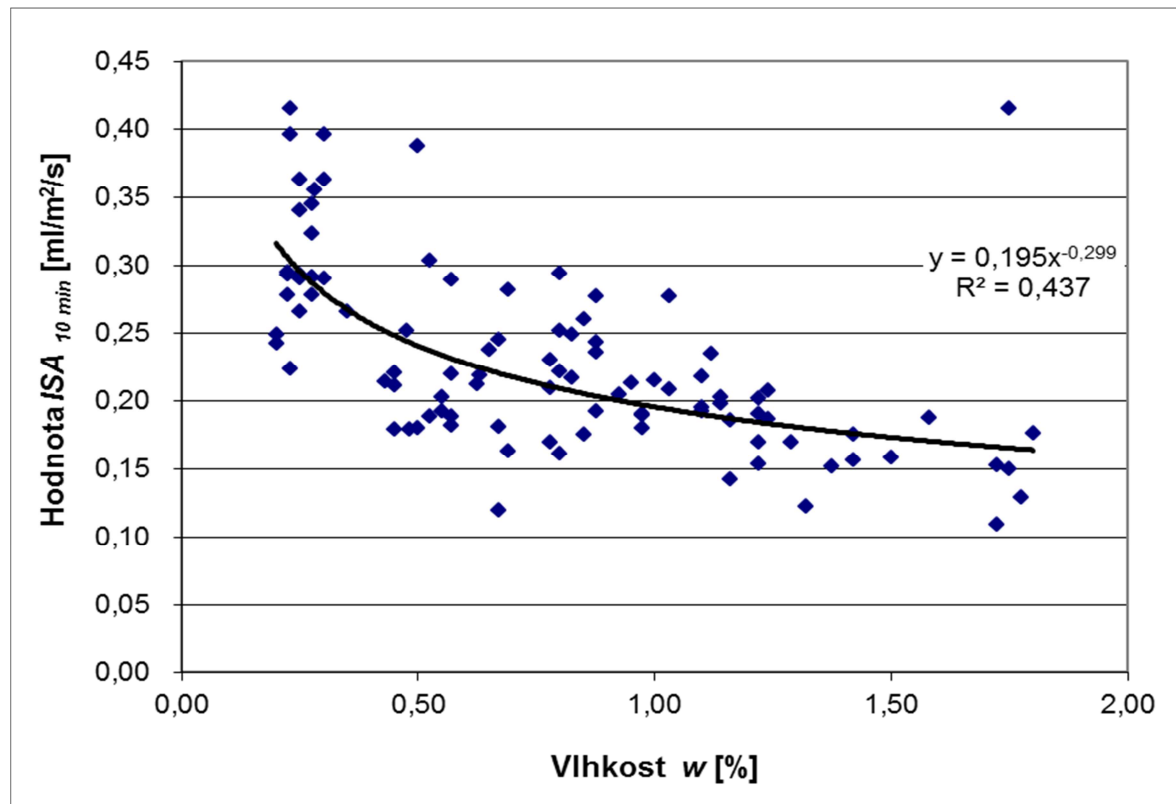
Tabulka Q – část 3: Výsledky měření ve stáří 1 rok: vlhkost - TPT - ISAT

| Č. měření | Datum<br>výroby /<br>zkoušení | Stáří | Vlhkost | TPT                                   |                  |         | ISAT                              |         |                       |         |
|-----------|-------------------------------|-------|---------|---------------------------------------|------------------|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------|---------|
|           |                               |       | w       | k <sub>T</sub>                        | k <sub>T,3</sub> | vrstva  | ISA <sub>10 min</sub>             |         | ISA <sub>30 min</sub> |         |
|           |                               |       | [%]     | * 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ] |                  |         | [ml/m <sup>2</sup> /s] / absorpce |         |                       |         |
| 65        | 16.6.2011<br>/<br>21.8.2012   | 1     | 1,10    | 5,08                                  | 0,987            | střední | 0,22                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 66        |                               |       | 0,80    | 4,10                                  | 0,615            | střední | 0,25                              | střední | 0,15                  | nízká   |
| 67        |                               |       | 1,22    | 3,45                                  | 0,744            | střední | 0,20                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 68        | 11. 8. 2011 /11. 9. 2012      | 1     | 0,23    | 3,411                                 | 0,313            | střední | 0,22                              | nízká   | 0,19                  | střední |
| 69        |                               |       | 0,20    | 5,245                                 | 0,469            | střední | 0,25                              | nízká   | 0,21                  | střední |
| 70        |                               |       | 0,20    | 5,291                                 | 0,474            | střední | 0,24                              | nízká   | 0,21                  | střední |
| 71        |                               |       | 0,28    | 4,686                                 | 0,447            | střední | 0,32                              | střední | 0,24                  | střední |
| 72        |                               |       | 0,23    | 4,999                                 | 0,457            | střední | 0,30                              | střední | 0,38                  | vysoká  |
| 73        |                               |       | 0,25    | 3,946                                 | 0,369            | střední | 0,34                              | střední | 0,25                  | střední |
| 74        |                               |       | 0,50    | 6,838                                 | 0,793            | střední | 0,39                              | střední | 0,27                  | střední |
| 75        |                               |       | 0,28    | 6,92                                  | 0,661            | střední | 0,35                              | střední | 0,27                  | střední |
| 76        |                               |       | 0,28    | 7,503                                 | 0,719            | střední | 0,36                              | střední | 0,27                  | střední |
| 77        |                               |       | 0,25    | 4,605                                 | 0,430            | střední | 0,29                              | střední | 0,19                  | střední |
| 78        |                               |       | 0,23    | 6,049                                 | 0,553            | střední | 0,29                              | střední | 0,23                  | střední |
| 79        |                               |       | 0,23    | 4,349                                 | 0,398            | střední | 0,28                              | střední | 0,23                  | střední |
| 80        |                               |       | 0,23    | 7,241                                 | 0,665            | střední | 0,40                              | střední | 0,29                  | střední |
| 81        |                               |       | 0,23    | 8,726                                 | 0,801            | střední | 0,42                              | střední | 0,30                  | střední |
| 82        |                               |       | 0,25    | 7,007                                 | 0,655            | střední | 0,29                              | střední | 0,20                  | střední |
| 83        |                               |       | 0,25    | 2,811                                 | 0,263            | střední | 0,27                              | střední | 0,21                  | střední |
| 84        |                               |       | 0,28    | 3,981                                 | 0,380            | střední | 0,29                              | střední | 0,22                  | střední |
| 85        |                               |       | 0,25    | 5,113                                 | 0,478            | střední | 0,36                              | střední | 0,25                  | střední |
| 86        | 4. 5. 2011 / 3. 5. 2012       | 1     | 0,80    | 2,104                                 | 0,316            | střední | 0,16                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 87        |                               |       | 0,83    | 3,433                                 | 0,527            | střední | 0,25                              | nízká   | 0,14                  | nízká   |
| 88        |                               |       | 0,78    | 4,649                                 | 0,686            | střední | 0,23                              | nízká   | 0,15                  | nízká   |
| 89        |                               |       | 1,03    | 5,226                                 | 0,956            | střední | 0,28                              | nízká   | 0,16                  | nízká   |
| 90        |                               |       | 1,22    | 1,677                                 | 0,362            | střední | 0,15                              | nízká   | 0,10                  | nízká   |
| 91        |                               |       | 1,22    | 1,143                                 | 0,246            | střední | 0,17                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 92        |                               |       | 1,42    | 0,729                                 | 0,187            | střední | 0,16                              | nízká   | 0,09                  | nízká   |
| 93        |                               |       | 1,16    | 2,009                                 | 0,411            | střední | 0,14                              | nízká   | 0,08                  | nízká   |
| 94        |                               |       | 0,88    | 2,23                                  | 0,357            | střední | 0,19                              | nízká   | 0,13                  | nízká   |
| 95        |                               |       | 0,78    | 2,913                                 | 0,430            | střední | 0,21                              | nízká   | 0,03                  | nízká   |
| 96        |                               |       | 0,69    | 1,564                                 | 0,214            | střední | 0,16                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |
| 97        |                               |       | 0,78    | 1,193                                 | 0,176            | střední | 0,17                              | nízká   | 0,12                  | nízká   |

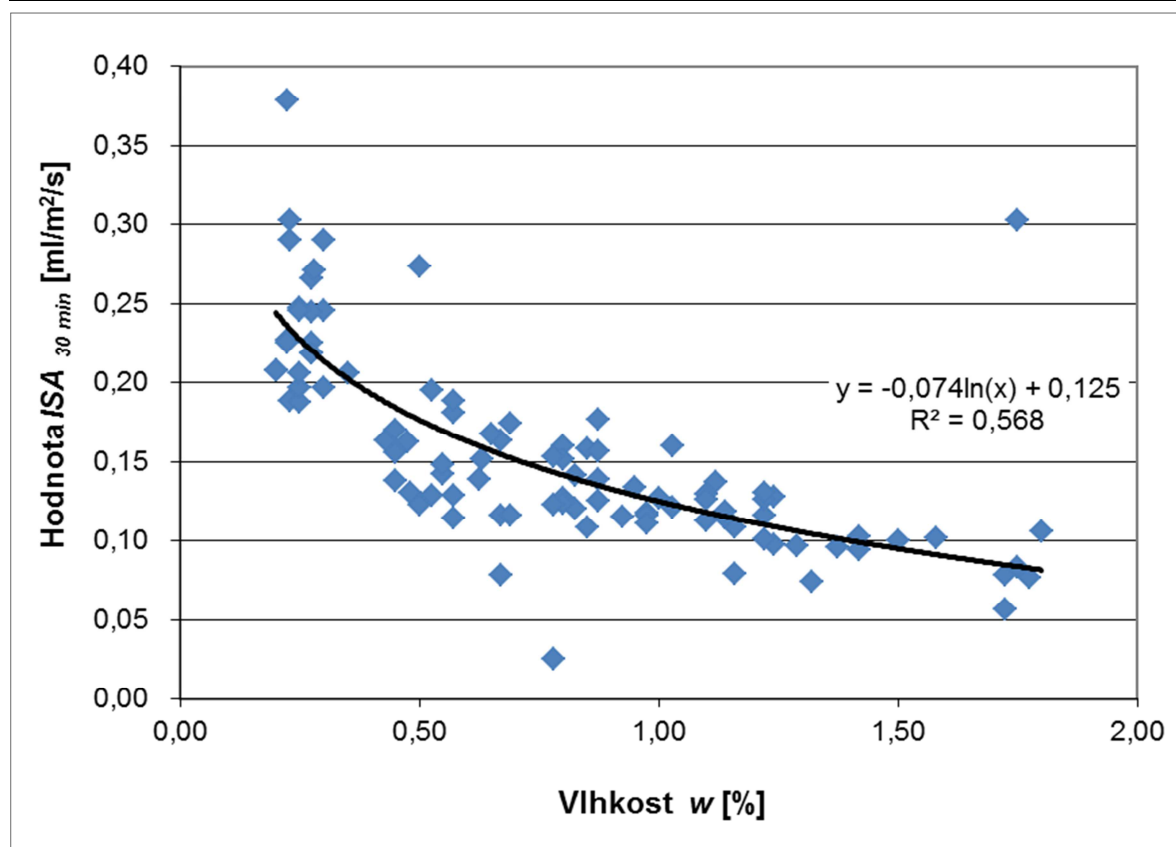
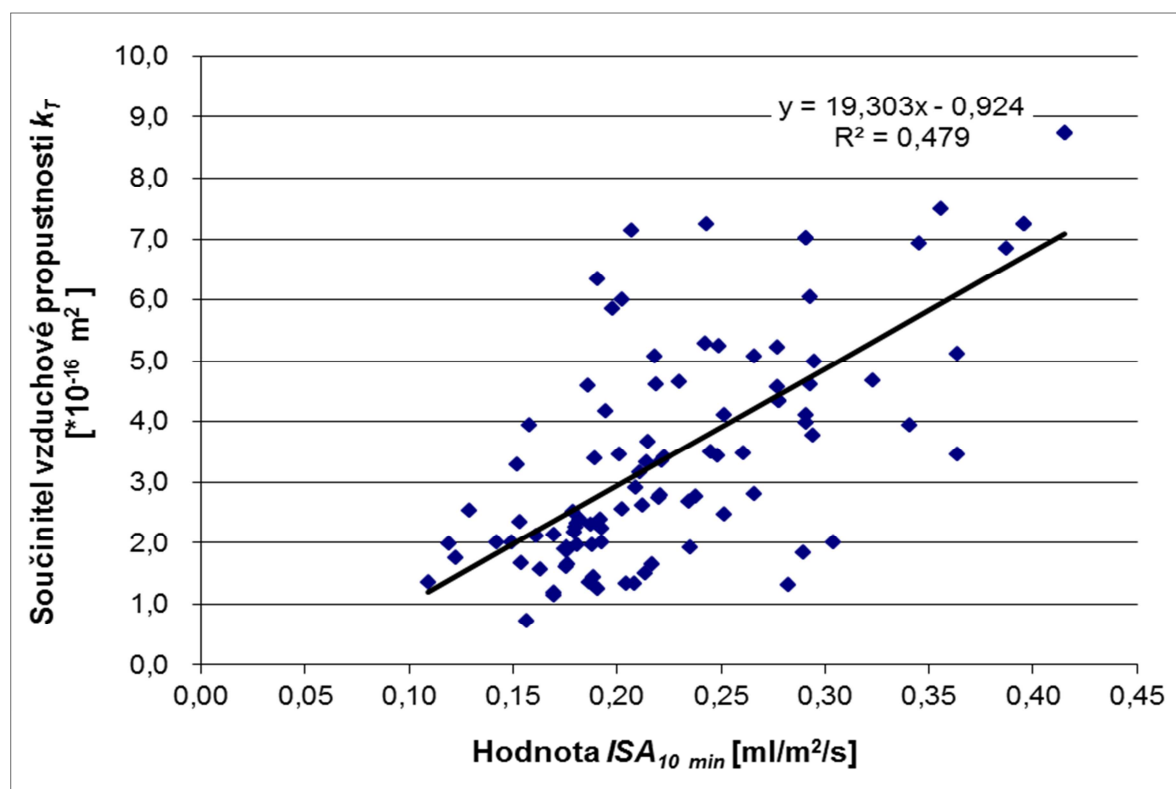


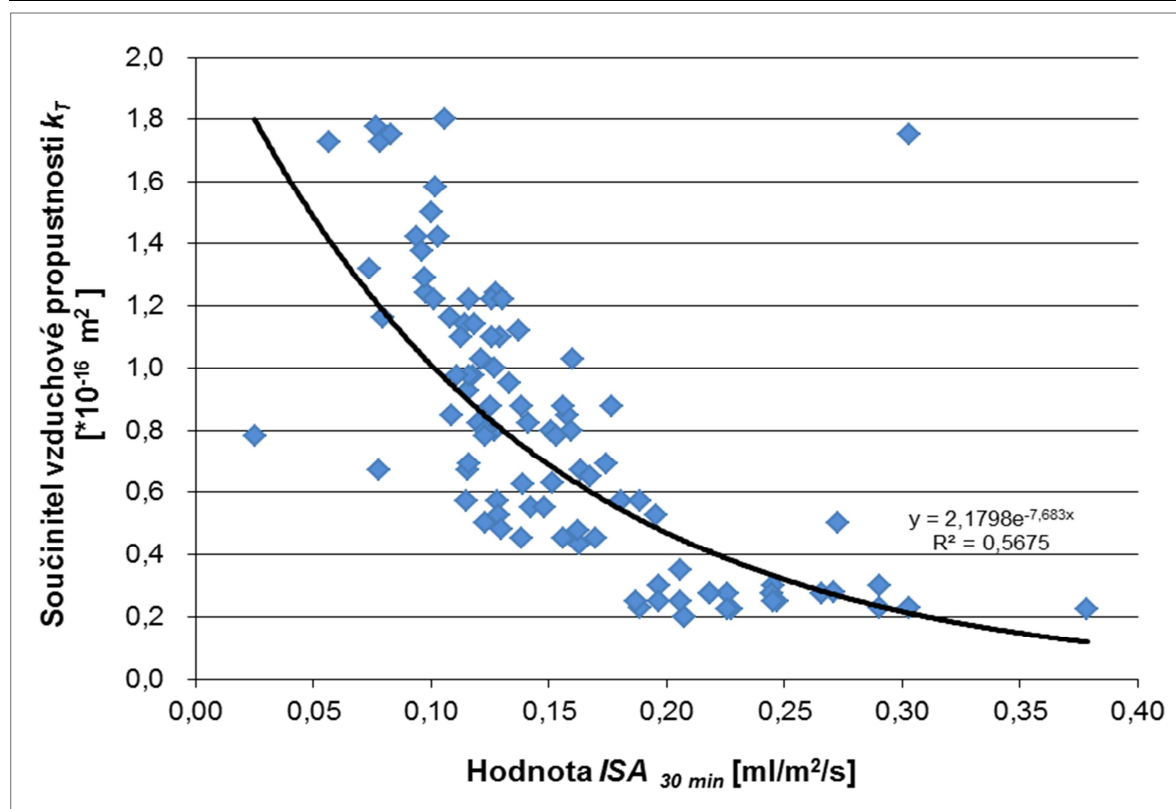


Obrázek R: Závislost součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok



Obrázek S: Závislost hodnoty  $ISA_{10 \text{ min}}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rok

Obrázek T: Závislost hodnoty  $ISA_{30\ min}$  na vlhkosti  $w$ ; stáří 1 rokObrázek U: Závislost součinitele  $k_T$  na hodnotě  $ISA_{10\ min}$ ; stáří 1 rok



Obrázek V: Závislost součinitele  $k_T$  na hodnotě  $ISA_{30 \text{ min}}$ ; stáří 1 rok

## Příloha č. 5 – Metodika ISAT

## METODIKA MĚŘENÍ POČÁTEČNÍ POVRCHOVÉ ABSORPCE PŘÍSTROJEM ISAT

(dále jen „metodika“)

## I. ÚVOD

Tato metodika stanovuje jednotný postup při měření počáteční povrchové absorpce přístrojem ISAT, postup výpočtu hodnot  $I_{SA}$ , vyhodnocení a definuje faktory ovlivňující měření na běžných betonech. Metodika vychází z britské normy BS 1881/208:1996 [1] a Operačního postupu ISAT [2].

## II. DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

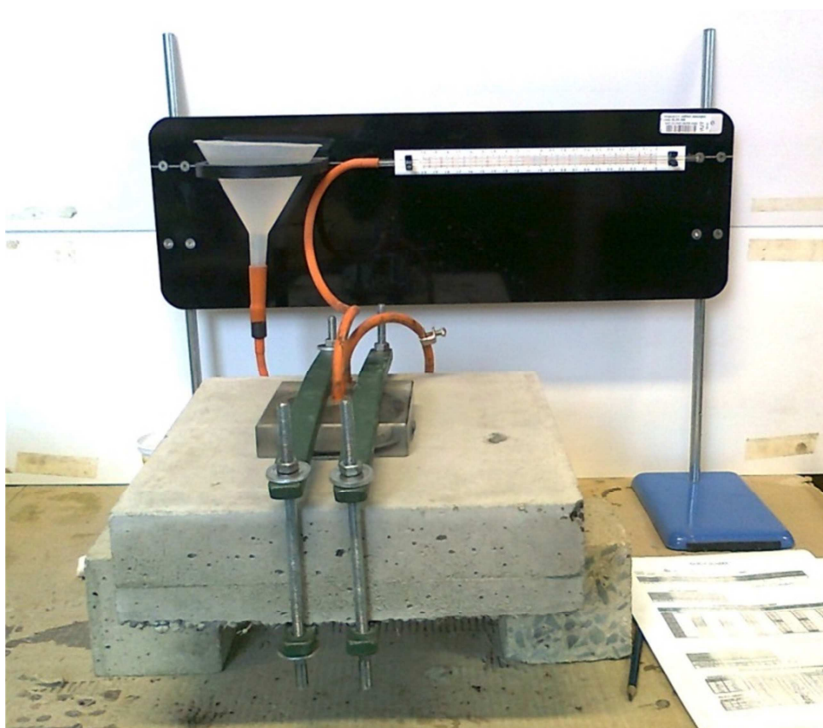
**Zkušební místo** – reprezentativní oblast betonu, která se posuzuje pro praktické účely a předpokládá se, že je stejné jakosti, jako okolní beton.

**Počáteční povrchová absorpce** - průtok vody do betonu skrz plochu definovanou plochou měřicí komory v čase při konstantním tlaku.

**Konstantní tlak** - tlak 200 mm vodního sloupce (0,02 bar), který vychází z předpokladu, že 200 mm vodního sloupce je horší než nejhorší expozice deště ve Velké Británii.

**Povrchová vrstva/oblast** – vrstva bezprostředně pod povrchem betonu

**ISAT (Initial Absorption Test)** – měřicí aparatura, kterou lze stanovit počáteční povrchovou absorpci



Obr. I. Měřicí aparatura ISAT

## III. PODSTATA ZKOUŠKY

Metoda stanovení počáteční povrchové absorbce spočívá v měření množství tlakové vody vnikající do zkušební vzorku přes plochu definovanou plochou akrylátové komory, jež je nepropustně upevněna k povrchu betonu pomocí svorek. Těsnost je zajištěna silikonem a těsněním na akrylátové komoře. Množství absorbované vody se získá měřením doby pohybu vody kapilárním systémem známého objemu. Průhledná komora je spojena s přívodní hadičkou a odvodní otvor komory je spojen se skleněnou kapilárou s měřítkem. Před vstupem do komory je hadička opatřena svorkou (objímkou) pro regulaci přívodu vody z nálevky. Aby byl vytvořen tlak 0,02 bar, je kapilára s měřítkem i nálevka s vodou umístěna 200 mm  $\pm$  5 mm nad komorou. Po naplnění komory je přívod vody z nálevky uzavřen a probíhá měření pohybu vody. Počet jednotek na měřítku po prvních 5 sekundách měření určuje předběžnou třídu kvality povrchu betonu a také periodu, po které se v průběhu měření budou odečítat data – 30 s, 1 min. nebo 2 min. Čtení souboru dat je prováděno min. po 10 a 30 minutách od momentu prvního smočení povrchu. Ilustrační foto tohoto přístroje je na Obr.I.

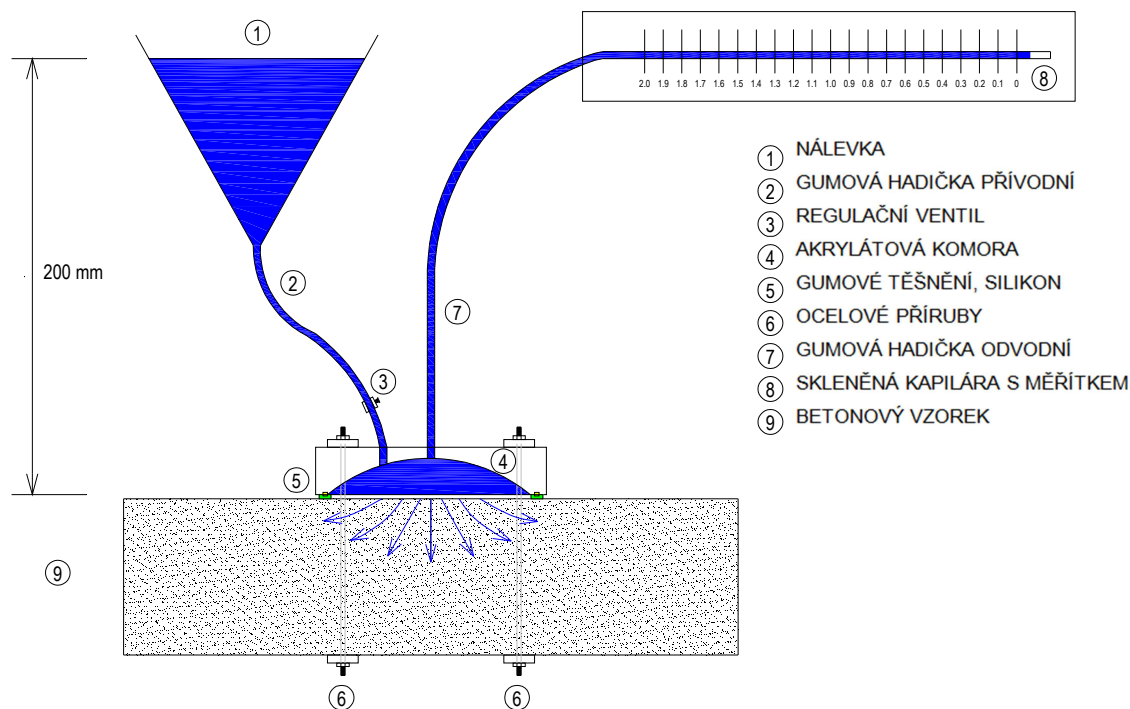
Metoda ISAT má také své omezení:

- a) Metoda je určena zejména pro laboratorní zkoušení. Pro zkoušky in-situ je využitelná jen velmi omezeně, neboť pro upevnění komory na povrchu betonu jsou nutné příruby a na jejich umístění musí být prostor (velmi malé rozměry k okrajům nosníku).
- b) Metoda je zcela nedestruktivní, ale po zkoušce zůstane povrch betonu znečištěn silikonem.
- c) Měření je prováděno na vzorcích betonu odebraných při samotné betonáži. Jako neoptimálnější se jeví dlaždice, hrany nebo krychle.
- d) Ze stávající konstrukce je také možné destruktivně vyjmout vývrty o min. průměru 150 mm a výšky min. 100 mm (z důvodu získání shodných výsledků měření).
- e) Zkoušena je pouze povrchová vrstva betonu v tloušťce 10 – 15 mm. S ohledem na korozi betonářské výztuže je třeba stanovit kvalitu celé krycí vrstvy oceli. Nicméně i tato hloubka může být dostatečná k rozlišení materiálů a stavu betonu.
- f) Výsledky měření mohou být významným způsobem ovlivněny povrchovou úpravou, včetně bleedingu (povrchový povlak vody), dle způsobu ošetřování. Povrchová karbonatace na vyzrálém povrchu betonu dosahuje prokazatelně nižších výsledků.
- g) Vlhkost betonu ovlivňuje výsledky měření.

#### IV. POPIS PŘÍSTROJE ISAT

Měřicí souprava (Obr. II.) se skládá z nálevky (1), která je spojena flexibilní přívodní hadičkou (2) s akrylátovou komorou (4). Na flexibilní přívodní hadičce je umístěna objímka (3) pro regulaci přítoku vody. Na akrylátové komoře je osazeno gumové těsnění, které spolu s čerstvě naneseným silikonem (5) a přírubami (6) zabezpečuje těsné spojení s povrchem betonového vzorku. Akrylátová komora (4) je spojena flexibilní odvodní hadičkou (7) se

skleněnou kapilárou (8), pod kterou je umístěna stupnice v rozsahu 0 – 200. Aby byl zajištěn přetlak 0,02 bar, jsou nálevka i skleněná kapilára umístěny 200 mm nad zkušební plochou. Zařízení je možné umístit vertikálně, horizontálně nebo na místo podhledu. Z následujícího obrázku jsou patrné jednotlivé části měřící aparatury.



Obr. II. Schéma zařízení ISAT

### PODROBNÝ POPIS PŘÍSTROJE:

Nálevka (1) je vyrobena ze skla nebo průhledného plastu o průměru v nejširší části cca 100 mm. Hladina v nálevce (1) i skleněná kapilára (8) musí být umístěny 200 mm  $\pm$  5 mm nad zkušební plochou, aby byl vytvořen tlak 0,02 baru.

Flexibilní hadička (2, 7) přívodní a odvodní je vyrobena z pružného materiálu (např. gumy) a její délka umožňuje natavení hladiny vody ve výšce 180 mm až 220 mm nad povrchem betonu.

Akrylátová komora (4) je vyrobena z jakéhokoliv vhodného tuhého nekorodujícího nepropustného průhledného materiálu (akrylát, polyester, epoxid, apod.), jejíž minimální plocha kontaktu vody a betonového povrchu je min. 5 000 mm<sup>2</sup>.

Měkké elastomerové těsnění (5) a na něj nanesený průhledný silikon zajišťuje vodotěsný spoj a vyrovnává nerovnosti na betonovém povrchu.

Stupnice (8) je kalibrována tak, že jeden dílek představuje 0,01 ml/m<sup>2</sup>/s. Popis kalibrace je uveden v kapitole. Délka kapiláry (8) musí být min. 240 mm (výhodou je délka přes 300 mm, neboť je možné lépe nastavovat počátek zkoušky; délka kapiláry by neměla přesahovat 1000 mm), aby byla pokryta stupnice v celé šíři 200 dílků. Průměr kapiláry je 0,4 mm až 1,0 mm a její přesný rozměr je kalibrován dle kapitoly V.

Pomůcky pro zkoušku:

- Stopky s přesností na 0,5 s;
- odměrný válec o objemu min. 10 ml;
- dostatečné množství pitné, destilované nebo deionizované vody;
- nádoba na vodu odtékající skleněnou kapilárou;
- teploměr s přesností na nejbližších 0,1 °C vhodný pro měření teploty vody a teploty na povrchu betonu;
- sušárna s regulací teploty (konstantní teplota 105 °C ± 5 °C) a času;
- klimatizační skříň s dostatečnou kapacitou pro uložení vysušených vzorků;
- váhy s dostatečnou přesností pro vážení vysušených vzorků a zjišťování ustálené vlhkosti.

## V. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ POČÁTEČNÍ POVRCHOVOU ABSORPCI

Všechny tyto faktory ovlivňují absorpci na povrchu betonu:

- a) vlhkost;
- b) složení betonové směsi;
- c) kamenivo;
- d) povrchové úpravy a jejich typ;
- e) zrání betonu;
- f) stáří;
- g) pórovitost, kavitace, trhliny (je třeba se vyhnout viditelným trhlinám);
- h) typ vody (výskyt nečistot ve vodě může ovlivnit rychlost absorpce, a proto je nutné používat vodu pitnou, destilovanou nebo deionizovanou, avšak pro kalibraci kapiláry musí být použita voda destilovaná nebo deionizovaná (viz 7.2).
- i) teplota.

## VI. KALIBRACE

### a) KALIBRACE SKLENĚNÉ KAPILÁRY

Před první použitím je nutné skleněnou kapiláru kalibrovat a zjistit její přesný průměr, neboť ovlivňuje rozestup dílků na stupnici. Postup stanovení průměru kapiláry je následující:

- Změří se délka kapiláry v milimetrech s přesností na 0,1 mm;
- pro odstranění povrchového napětí se kapilára propláchne mýdlovým roztokem a následně destilovanou nebo deionizovanou vodou o objemu min. 25 ml;
- akrylátová komora se připevní k povrchu betonu;
- připraví se odměrný válec o objemu min. 10 ml;
- zavře se přívodní kohout pod nálevkou a nálevka se naplní destilovanou nebo deionizovanou vodou;

- konečná hladina v nálevce i skleněná trubice musí být 200 mm  $\pm$  5 mm nad zkušebním povrchem;
- změří se teplota vody v nádrži  $\pm$  0,2 °C;
- otevře se přívodní kohout, akrylátová komora se zaplní vodou a vytlačená voda bude odtékat skleněnou kapilárou;
- případné bubliny v kapiláře se odstraní zvednutím skleněné kapiláry do výšky 300 mm nad povrch betonu;
- kapilára se umístí 200 mm  $\pm$  5 mm pod vodní hladinu (tj. na úroveň betonového povrchu) a změří čas v sekundách, který je nutný k naplnění odměrného válce o objemu 10 ml;
- tento postup se opakuje alespoň třikrát a z naměřených časů se vypočte aritmetický průměr.

Průměr kapiláry lze vypočítat dle následujícího vzorce:

$$r^4 = \frac{L}{20\mu \cdot t}, \text{ kde}$$

$r$ ... poloměr kapiláry [mm],  $d$ ... průměr kapiláry [mm],  $L$ ... délka kapiláry [mm],  $t$ ... čas nutný k naplnění odměrného válce o objemu 10 ml [s],  $\mu$ ... koeficient viskozity a geometrie zařízení v závislosti na teplotě [-]

Tab. 47: Hodnota koeficientu  $\mu$  v závislosti na teplotě vody [2]

| Teplota vody [°C]    | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| Koeficient $\mu$ [-] | 3,73 | 3,82 | 3,91 | 4,00 | 4,09 |

## b) PŘÍPRAVA STUPNICE

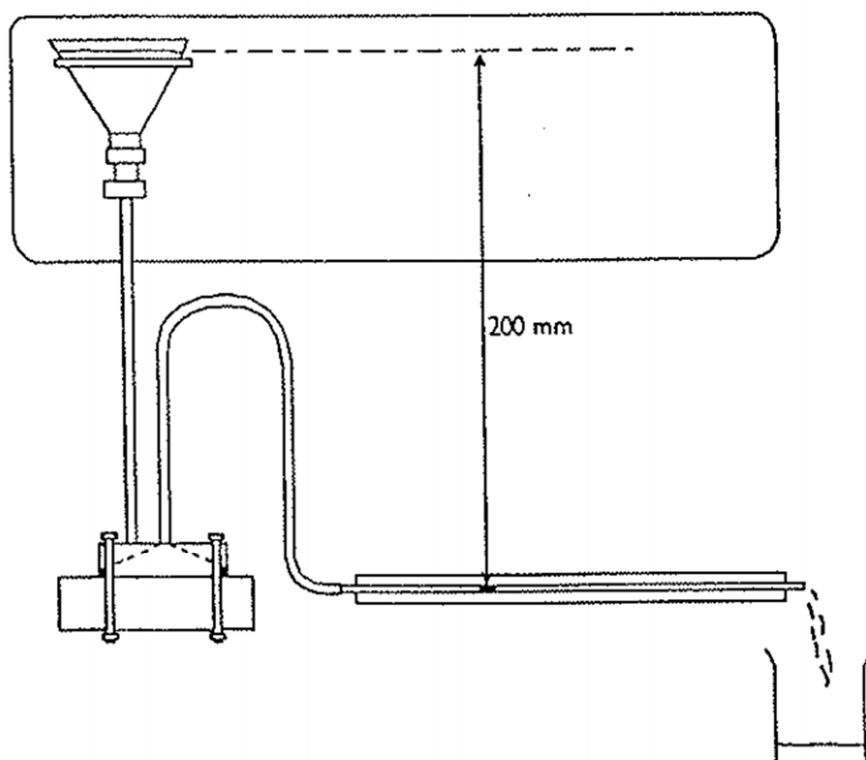
Z následujícího vzorce se stanoví délku jednoho dílku:

$$m = 6 \cdot 10^{-4} \frac{A_1}{A_2} \cdot I S A_t = \frac{0,6D}{t} \cdot k_S \cdot k_{tem} \text{ kde} \quad (38)$$

$m$ ... délka jednoho dílku [mm],  $A_1$ ... zkušební plocha vzorku - při průměru akrylátové komory 85 mm je zkušební plocha 5674,5 mm<sup>2</sup> [mm<sup>2</sup>],  $A_2$ ... průřezová plocha skleněné kapiláry  $A_2 = \pi \cdot r^2$  [mm<sup>2</sup>],  $r$ ... poloměr skleněné kapiláry [mm], výpočet viz. kapitola Kalibrace skleněné kapiláry.

Délka jednoho dílku bude představovat 0,01 ml/m<sup>2</sup>/s. Měřítka umístěná za skleněnou kapilárou se připraví v rozsahu 200 dílků  $\pm$  10 %.





Obr. III. Schéma kalibrace skleněné kapiláry [2]

## VII. POSTUP PROVÁDĚNÍ ZKOUŠKY

### a) PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

#### a1) POČET VZORKŮ

Měření je vhodné provádět na nejméně třech vzorcích tak, aby reprezentovaly zkoušený beton. Zkušební místo není vhodné volit tam, kde jsou viditelné trhliny (i vlasové), místo je značně pórovité, nerovné, na místě již jednou zkouška prováděna byla a povrchová vrstva je znečištěná silikonem, olejem nebo jinou chemikálií, apod. Všechny tyto okolnosti mohou ovlivnit výsledky zkoušky.

#### a2) VLHKOST VZORKŮ

Zkoušku lze provádět na vzorcích vysušených, nevysušených nebo in-situ. Obecně platí, že je nutné zkoušet vzorky s rovnoměrnou vlhkostí a vlhkost zohlednit při vyhodnocení výsledků.

#### Vysušené vzorky

Vzorky se vysuší při teplotě  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ , dokud není dosaženo konstantní hmotnosti, tj. teplota se nemění o více než 0,1 % hmotnosti během 24 hodin sušení. Poté se vzorek uloží do klimatizační skříně s poklesem teploty  $\pm 2\text{ °C}$ , ve které je po celou dobu před provedením zkouškou. Hlinitanové betony není možné sušit.

Vysušené betony vykazují méně proměnlivé výsledky než betony nesušené, ale sušení může způsobit změny ve struktuře cementové pasty, proto je nutné při vyhodnocování teplotu sušení zohlednit.

### **Nevysušené vzorky**

Před prováděním zkoušky se betonové vzorky uloží do klimatizační skříně nebo volně v laboratoři při teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu nejméně 48 hodin.

### **Zkoušení In-situ**

Povrch betonu je nutné chránit před vodou i vlhkostí po dobu nejméně 48 hodin před prováděním zkoušky. Před slunečním zářením je nutné vzorky chránit po dobu nejméně 12 hodin před a během zkoušky.

### **Před zkouškou**

Před umístěním akrylátové komory se vybere vhodné zkušební místo, které musí být čisté, suché, bez nečistot a mastnot. Vybrané místo:

- 1) označí se nesmazatelnou fixou nebo tužkou přesný obrys akrylátové komory,
- 2) změří se povrchová vlhkost  $w$  [%],
- 3) změří se součinitel vzduchové propustnosti  $k_T$  [ $\text{m}^2$ ]
- 4) teplota betonu s přesností na  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## **b) VODA**

Při laboratorních zkouškách se zásadně používá pitná, destilovaná nebo deionizovaná voda o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a je nutné zabránit kolísání teploty vody během zkoušky.

## **c) UPEVNĚNÍ AKRYLÁTOVÉ KOMORY**

Do akrylátové komory se umístí gumové těsnění, nanese se na něj rovnoměrná vrstva univerzálního silikonu (v tubě, nanáší se pomocí pistole), umístí se na vybrané zkušební místo a připevní se přírubami k betonovému povrchu. Při utahování přírub se postupuje velmi obezřetně a příruby se přitahují rovnoměrně tak, aby nedošlo k posunu akrylátové komory po betonovém povrchu. Před zkouškou se zkontroluje, zda je komora pevně připevněna k povrchu a není zřetelná netěsnost.

## **d) ZAHÁJENÍ ZKOUŠKY**

- 1) Uzavře se kohout regulující přívod vody do akrylátové komory a připraví se nádoba chytající přebytečnou vodu z kapiláry.

- 2) Nálevka se naplní pitnou, destilovanou nebo deionizovanou vodou a zkontroluje se hladina vody. Hladina vody musí být  $200 \text{ mm} \pm 10 \%$  nad zkušebním povrchem. U vertikálních měření se výška určuje od středu akrylátové komory. Skleněná kapilára by měla být umístěna ve stejné výšce jako hladina vody v nálevce.
- 3) Zkouška se spustí uvolněním kohoutu, voda zaplní prostor v akrylátové komoře a přebytečná voda odtéká skleněnou kapilárou. Pokud jsou na akrylátové komoře nebo ve skleněné kapiláře vzduchové bubliny, je nutné je odstranit zvýšením tlaku – zvednutím nálevky do úrovně alespoň 300 mm. Až je průtok plynulý, je možné pokračovat ve zkoušce.
- 4) Zkontroluje se výška hladiny vody a doplní se voda v nádrži. Výše uvedený postup nesmí trvat déle než 10 s.
- 5) Kohout se uzavře a spustí se stopky, až je meniskus v kapiláře na stupnici. Není nutné začínat od 0, ale je možné začít od jiných hodnot v rozmezí 0 až 10, avšak po testu je nutné odečíst počáteční hodnotu. Je také možné posunout celou kapilární trubičku a nastavit meniskus na požadovanou hodnotu. Tento bod nesmí trvat déle než 10 s, avšak čím je doba kratší, tím je to lepší.
- 6) ZÁKLADNÍ TEST: Měří se posun menisku v čase 5 s, 30 s, 60 s a 120 s. Hodnota menisku po 5 s určuje sekundární interval čtení, tj. 30 s, 1 min nebo 2 min.

Tab. IV. Klasifikace Základního testu a určení intervalu měření počáteční povrchové absorpce metodou ISAT

| Stanovení doby podle pohybu menisku<br>tzv. Základní test* |                                                                           |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Počet dílků za<br>5 s od počátku<br>testu                  | Perioda, během které bude pohyb měřen<br>(tzv. Sekundární interval čtení) |
| < 3                                                        | 2 min                                                                     |
| <b>3 až 9</b>                                              | <b>1 min</b>                                                              |
| 10 až 30                                                   | 30 s                                                                      |
| > 30                                                       | max. počet, počáteční absorpce je $> 3,6 \text{ ml/m}^2/\text{s}$         |
| Poznámka: 1 dílek = $0,01 \text{ ml/m}^2/\text{s}$         |                                                                           |

Základní test je možné vynechat, pokud měříme stejný typ betonu a v prvním testu vyšla perioda 1 min.

- 7) Po stanovení hlavního testu se kohout povolí a průběžně se doplňuje voda tak, aby na beton působilo 200 mm vodního sloupce. Nadbytečná voda odkapává volným koncem skleněné kapiláry.
- 8) HLAVNÍ TEST: Nachystá se meniskus a měření se provádí v čase 10 min a 30 min (norma také uvádí 60 min a 120 min, ale dle zkušeností autorky to není nutné). Jedná se

o tzv. primární interval čtení, od kterého se počítá sekundární interval čtení. Počet měření v sekundárním intervalu je max. 10, min. 2 měření.

Příklad: Pokud se v základním testu po 5 s naměřilo 6 dílků, tj. 0,06 ml/m<sup>2</sup>/s, následují měření v čase: 10 min, 11, 12, ...až 20 min, dále 30 min, 31 min, 32 min.

- 9) V průběhu zkoušky se obsah vlhkosti v betonu zvyšuje a kapilární póry uvnitř betonu se zaplňují vodou. Se zvyšujícím se časem zkoušky se rychlost absorpce betonu snižuje.
- 10) Pokud je hodnota  $ISA$  po 10 min nižší než 0,05 ml/m<sup>2</sup>/s, je možné zastavit test s komentářem: Beton je velmi nepropustný a citlivý na dlouhodobé zkoušky.  
Pokud je hodnota  $ISA$  po 10 min vyšší než 3,60 ml/m<sup>2</sup>/s, je možné zastavit test s komentářem: Beton je velmi propustný a citlivý na tuto zkušební metodu.
- 11) Po ukončení zkoušky se zkušební komora opatrně odstraní, silikon se nechá zaschnout a poté se změří skutečná zkušební plocha  $A_{SS}$  (min. 2 kolmé průměry, optimálně 4 měření s přesností na 0,1 mm, ze kterých se spočítá aritmetický průměr a stanoví koeficient plochy  $k_S$ ).

## VIII. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V kapitole V. je výčet hlavních faktorů, které ovlivňují výsledky měření a při vyhodnocování by měly být zohledněny.

Rychlost počáteční povrchové absorpce (průtok vody definovanou plochou) je stanovena rovnicí:

$$ISA_t = \frac{0,6 D}{t} \cdot k_S \cdot k_{tem}, \text{ kde} \quad (39)$$

$D$ ... počet dílků,  $t$ ...čas [s].

- **Koeficient plochy  $k_S$**  – v závislosti na množství aplikovaného silikonu na gumové těsnění může dojít k významnému zmenšení zkušební plochy:

$$k_S = A_{SS} / A_{ST} [-], \text{ kde} \quad (40)$$

$k_S$  ... koeficient plochy

$A_{SS}$ ... skutečně naměřená zkušební plocha po zkoušce [mm<sup>2</sup>]

$A_{ST}$ ... plocha teoretická, definovaná plochou komory (min. 5 000 mm<sup>2</sup>); při průměru akrylátové komory 85 mm je zkušební plocha 5 674,5 mm<sup>2</sup> [mm<sup>2</sup>]

- **Koeficient teploty betonu  $k_{tem}$**  – v důsledku změn viskozity vody v závislosti na teplotě může teplota významným způsobem ovlivnit výsledky testu a výsledky je nutné uvádět při srovnávací teplotě 20 °C.

Tab. V. Stanovení koeficientu teploty  $k_{tem}$ 

| Teplota na povrchu betonu [°C]          | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Koeficient teploty betonu $k_{tem}$ [-] | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |

- **Vlhkost** – v důsledku závislosti vlhkosti na absorpci betonu je nutné výsledky přepočítat na srovnávací 3% vlhkost, kde se pro obvyčejné betony doporučuje následující přepočet:

$$ISA(10 \text{ min.})_3 = ISA(10 \text{ min.})_w \cdot e^{a(3-w)}, \text{ kde} \quad (41)$$

$ISA_{(10 \text{ min})3}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při srovnávací povrchové vlhkosti  $w = 3 \%$  [ml/m<sup>2</sup>/s],

$ISA_{(10 \text{ min})w}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při aktuální povrchové vlhkosti  $w$  [ml/m<sup>2</sup>/s],

$a$ ... opravný vlhkostní koeficient v intervalu (0,3665; 0,4390), doporučené  $a = 0,4027$ ,

$w$ ... povrchová vlhkost [%].

$$ISA(30 \text{ min.})_3 = ISA(30 \text{ min.})_w \cdot e^{a(3-w)}, \text{ kde} \quad (42)$$

$ISA_{(30 \text{ min})3}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při srovnávací povrchové vlhkosti  $w = 3 \%$  [ml/m<sup>2</sup>/s],

$ISA_{(30 \text{ min})w}$ ... počáteční povrchová absorpce  $ISA$  po 10 min při aktuální povrchové vlhkosti  $w$  [ml/m<sup>2</sup>/s],

$a$ ... opravný vlhkostní koeficient v intervalu (0,2842; 0,338), doporučené  $a = 0,3111$ ,

$w$ ... povrchová vlhkost [%].

Po zohlednění všech faktorů ovlivňující měření je výsledek zkoušky možné klasifikačně zařadit do některé z absorbcí uvedených v následující tabulce.

Tab. VI. Klasifikace počáteční povrchové absorpce betonu aparaturou ISAT [2]

| [ml/m <sup>2</sup> /s]   | Absorbce betonu |             |        |
|--------------------------|-----------------|-------------|--------|
|                          | nízká           | střední     | vysoká |
| $ISA_{10 \text{ min.}}$  | < 0,25          | 0,25 ~ 0,50 | > 0,50 |
| $ISA_{30 \text{ min.}}$  | < 0,17          | 0,17 ~ 0,35 | > 0,35 |
| $ISA_{60 \text{ min.}}$  | < 0,10          | 0,10 ~ 0,20 | > 0,20 |
| $ISA_{120 \text{ min.}}$ | < 0,07          | 0,07 ~ 0,15 | > 0,15 |

Orientačně je také možné porovnat naměřené výsledky s ostatními parametry – viz následující tabulka.

Tab. VII. Obecný vztah mezi propustností a zkouškou absorpce [2]

| Metoda                                                                                                                           |                        | Propustnost / absorpce betonu |                                       |                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
|                                                                                                                                  |                        | nízká                         | střední                               | vysoká              |
| Vnitřní propustnost $k$                                                                                                          | [m <sup>2</sup> ]      | < 10 <sup>-19</sup>           | 10 <sup>-19</sup> ~ 10 <sup>-17</sup> | > 10 <sup>-17</sup> |
| ISAT – 10 min                                                                                                                    | [ml/m <sup>2</sup> /s] | < 0,25                        | 0,25 ~ 0,50                           | > 0,50              |
| Figg test (voda)                                                                                                                 | [s]                    | > 200                         | 100 ~ 200                             | < 100               |
| Modifikovaný Figgův test (vzduch)                                                                                                | [s]                    | > 300                         | 100 ~ 300                             | < 100               |
| BS vodní absorpce 30 min                                                                                                         | [%]                    | < 3                           | 3 ~ 5                                 | > 5                 |
| DIN 1048 – 4 dny                                                                                                                 | [mm]                   | < 30                          | 30 ~ 60                               | > 60                |
| Přibližné hodnoty: - pro vodu při 20 °C je $K_w=9,75 \cdot 10^6 k$ m/s,<br>- pro vzduch při 20 °C je $K_g=6,5 \cdot 10^5 k$ m/s. |                        |                               |                                       |                     |

Pokud není k dispozici měřící zařízení ISAT a je podstatné výsledky této metody zohlednit při hodnocení trvanlivosti, je možné pro přepočítání  $k_T$  na  $ISA$  využít následujících vztahů:

$$ISA_{10min} = \frac{p_1 k_T + p_2}{k_T + q_1}, \text{ kde} \quad (43)$$

doporučené hodnoty koeficientů jsou  $p_1 = 0,5539$ ,  $p_2 = -0,03798$ ,  $q_1 = 0,6869$ .

$$ISA_{30min} = \frac{p_1 k_T + p_2}{k_T + q_1}, \text{ kde} \quad (44)$$

doporučené hodnoty koeficientů jsou  $p_1 = 0,4306$ ,  $p_2 = 0,03893$ ,  $q_1 = 2,042$ .

## IX. PROTOKOL O ZKOUŠCE

Protokol o zkoušce musí obsahovat tyto údaje:

- název, adresa a místo provedení zkoušek,
- jméno a adresa objednatele,
- předmět zkoušky, jeho technický popis, laboratorní číslo vzorku nebo identifikaci konstrukce a její zkoumané části,
- datum odběru zkušební vzorku, přijetí do laboratoře a provedení zkoušky,
- údaje o odběru vzorků, vč. jméno pracovníka, který odběr prováděl,
- doplňkové informace požadované specifickými metodami nebo objednatelem,
- způsob ošetřování zkušebních těles,
- teplota a vlhkost prostředí,
- naměřené hodnoty aktuální povrchové vlhkosti  $w$ , koeficient vzduchové propustnosti  $k_T$ ,
- grafické zpracování dat, je-li to vhodné,

- k) prohlášení o tom, že se výsledky zkoušek týkají jen předmětu zkoušek, a že protokol nenahrazuje jiné právní dokumenty (např. správního charakteru), které jsou po objednateli zkoušek orgány státní správy požadovány,
- l) prohlášení, že bez písemného souhlasu vedoucího laboratoře, se nesmí protokol reprodukovat jinak, než celý,
- m) jméno, příjmení, tituly, funkce a podpis osoby odpovědné za schválení zkušebního protokolu,
- n) datum vyhotovení protokolu.

## **X. ZÁVĚR**

Při práci s aparaturou ISAT je nutné dodržovat výše uvedené pokyny a postupy a zohledňovat všechny faktory, které výsledek zkoušky ovlivňují. Výsledné hodnoty absorpce se zařadí do jedné ze tříd absorbce (nízká, střední, vysoká).

Výsledky měření slouží jako důležitý podklad pro hodnocení aktuální trvanlivosti betonu.

## **XI. CITOVANÉ NORMY A PŘEDPISY, POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] BS 1881/208:1996 Testing concrete, part 208: Recommendations for the determination of the Initial surface Absorption of concrete. ISBN 0 580 26201 4.
- [2] Operating Instructions. Initial Surface Absorption Test 35-3985, 35-3989, 35-3993. ELE International 2003.
- [3] STATE OF THE ART REPORT OF RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC 189-NEC, "Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover"; edited by R. Torrent and L. Fernandez Luco. *Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover*. Bagneux: RILEM, 2007, xix, 223 s. ISBN 978-2-35158-054-7.