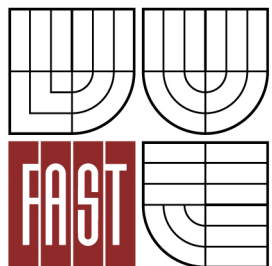




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

OBOR

3911V006 FYZIKÁLNÍ A STAVEBNĚ
MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. ZLATA KADLECOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ ANTON, Ph.D.

OPONENTI

prof. Ing. JIŘÍ ADÁMEK, CSc.
doc. Ing. KAREL KOLÁŘ, CSc.
doc. Ing. JIŘÍ DOHNÁLEK, CSc.

BRNO 2016

Klíčová slova:

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

Key words:

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

Název pracoviště:

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍL PRÁCE	6
3 METODIKA PRÁCE	7
4 VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ETAP	10
4.1 VÝSLEDKY ETAPY 1 – Podrobné seznámení s měřicími přístroji.....	10
4.2 VÝSLEDKY ETAPY 2 – Návrh veličin pro experimentální sledování	10
4.3 VÝSLEDKY ETAPY 3 – Návrh a množství zkušebních těles, receptury, uložení	11
4.4 VÝSLEDKY ETAPY 4 – Výroba zkušebních těles a způsob zrání	11
4.5 VÝSLEDKY ETAPY 5 – Experimentální měření.....	12
4.6 VÝSLEDKY ETAPY 6 – Zhodnocení naměřených dat	13
4.6.1 Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.	13
4.6.1.1 Provzdušněný beton třídy C35/45 XF4 s 2 % a 10 % obsahem vzduchu	13
4.6.1.2 Neprovzdušněný beton třídy C35/45 (stáří 0,5 roku a 2,5 roku)	13
4.6.2 Experimentální měření v rámci projektu GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech.....	14
4.6.3 Experimentální měření v projektu FAST-J-10-96 Porovnání výsledků zkoušek propustnosti povrchové vrstvy betonu pro vodu a plyny	14
4.6.4 Experimentální měření v projektu FAST-J-11-12 Měření propustnosti betonu NDT metodami jako podklad k odhadu aktuální trvanlivosti.....	16
4.6.5 Experimentální měření v projektu FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu.....	16
4.7 VÝSLEDKY ETAPY 7 – Vytvoření přepočtových vztahů a závěrečná analýza dat	16
5 VZNIK METODIK	21
6 VĚDECKÝ PŘÍNOS	22
7 ZÁVĚR	23
8 POUŽITÁ LITERATURA.....	24
9 CURRICULUM VITAE	25
10 ABSTRACT	28

1 ÚVOD

Trvanlivostí rozumíme schopnost betonové konstrukce odolávat účinkům prostředí, ve kterém se nachází a to po celou dobu její životnosti. Při hodnocení aktuální trvanlivosti, tj. trvanlivosti v tomto okamžiku (dnes, nyní), rozumíme pod pojmem trvanlivost 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), stanovení odtrhové pevnosti, propustnost pro tlakovou vodu, propustnost pro kapaliny a plyny, absorpční vlastnosti, difúzní vlastnosti, mrazuvzdornost, odolnost vůči posypovým solím, kvantifikace trhlin na povrchu betonu (od chyb v technologii výroby, ukládání a ošetřování, zatěžování, působení vnějších vlivů (agresivní látky)), odolnost proti působení agresivních látek - CO_2 , SO_2 , 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 betonu nelze popsat pouze jednou zkouškou, ale že je pro popsání stavu povrchové vrstvy potřeba kombinace různých zkoušek. Ve většině případů se shodují na tom, že nejlépe mohou vystihnout vlastnosti povrchové vrstvy zkoušky propustnosti pro kapaliny a plyny [3], protože trvanlivost je funkcí propustnosti [1].

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 [2], [3].

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 skutečným podmínkám, tj. tlaku deštěm a větrem.

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 (Torrent Permeability Tester), GWT (Germanns Water Permeability Tester) a ISAT (Initial Surface Absorption Test).

2 CÍL PRÁCE

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 [4], ve které jsou nejen popsány jednotlivé metody pro zkoušení permeability, ale také zveřejněny výsledky srovnávacích testů na těchto přístrojích. Autoři se však zaměřili jen na vybrané metody a srovnávací testy nebyly provedeny na všech typech měřicích zařízení. A právě na tuto problematiku jsem navázala.

Cílem této práce bylo vytvořit přepočtové vztahy mezi metodami pro hodnocení propustnosti povrchových vrstev betonu a umožnit tak orientační hodnocení kvality 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“ [5]. 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 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 měřicími přístroji.

3 METODIKA PRÁCE

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 zkušebních betonových dlaždicích byl zjištěn rozsah jejich použití i omezení při experimentálním měření a prostudována odborná legislativa [7], [8], [9][10].

- **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 [5] 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 těles 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 zrála 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_I přístrojem GWT. Tento postup byl zvolen s ohledem na porovnatelnost výsledků mezi sebou.

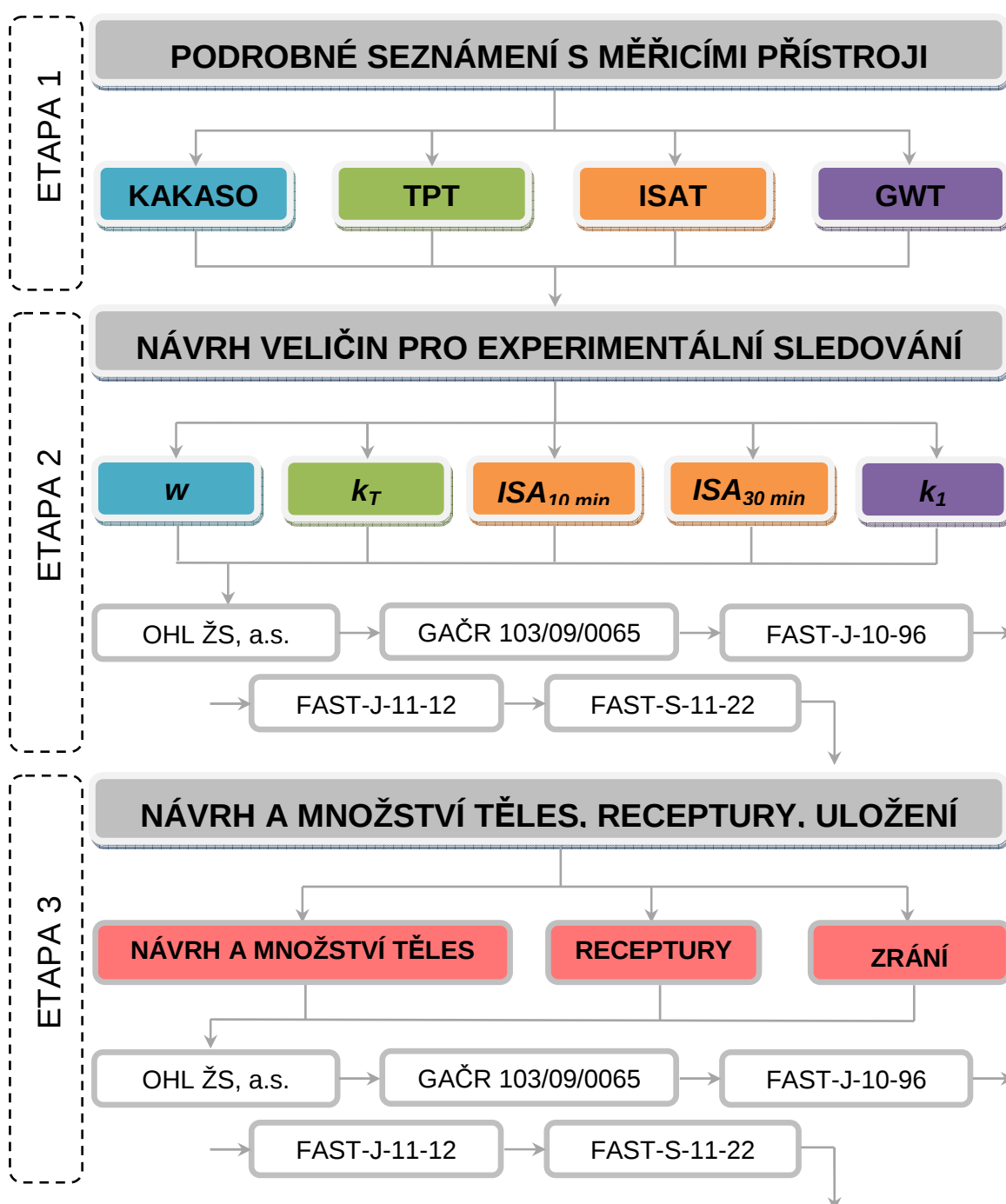
- **ETAPA 6 – zhodnocení naměřených dat**

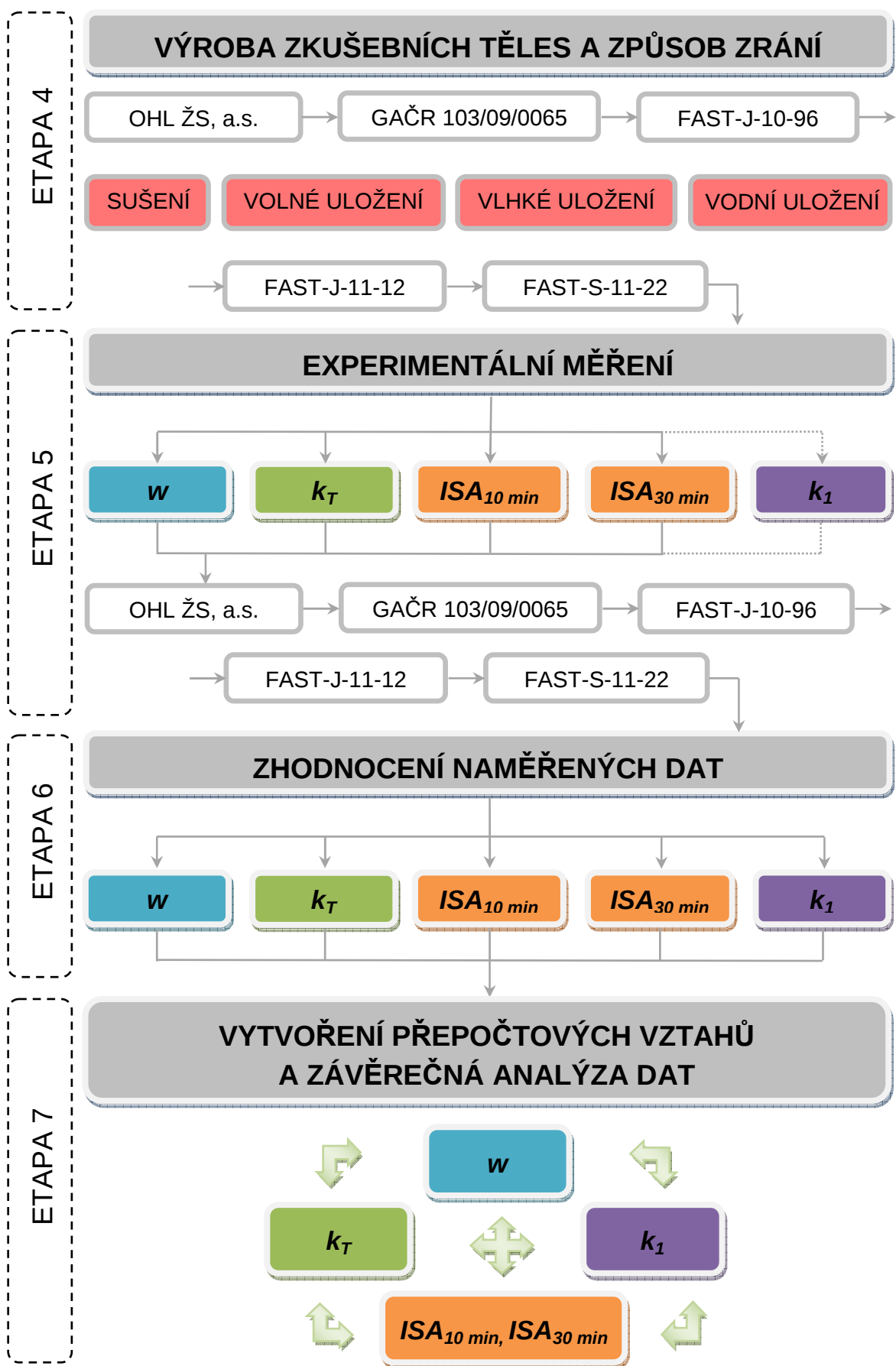
Šestá etapa byla věnována zhodnocení naměřených dat, kde bylo stručně shrnuto, jakých závěrů bylo experimentálním měřením dosaženo.

- **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.





Obrázek 1 Schéma etap disertační práce

4 VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ETAP

4.1 VÝSLEDKY ETAPY 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. Před prvním měřením proběhlo seznámení s obsluhou přístrojů a také byla ověřena dostupnost dalších přístrojů pro měření propustnosti.

Existuje mnoho metod, které se používají pro měření permeability, 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 [7],
- Přístroj GWT – Germanns Water Permeability Tester [8],
- Metoda ISAT – Initial Surface Absorption Test [9], [10],
- Vlhkoměr KAKASO (PSMXi) [11].

Na prvních zkušebních betonových dlaždicích a kvádrech byl zjištěn rozsah jejich použití i omezení při experimentálním měření a byla prostudována dostupná odborná literatura.

4.2 VÝSLEDKY ETAPY 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.

Tabulka A Přehled hlavních veličin pro experimentální sledování

Ozn.	veličina	metoda	jednotka
k_T	součinitel vzduchové propustnosti	TPT	[m ²]
k_1	součinitel vnitřní propustnosti	GWT	[m ²]
$ISA_{10\ min}$	průtok vody po 10 min. absorpce	ISAT	[ml/m ² /s]
$ISA_{30\ min}$	průtok vody po 30 min. absorpce	ISAT	[ml/m ² /s]
w	odhad povrchové hmotnostní vlhkosti	KAKASO	[%]

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.

4.3 VÝSLEDKY ETAPY 3 – Návrh a množství zkušebních těles, receptury, uložení

Po prvotních měřeních byly jako nejvhodnější zkušební tělesa vybrány betonové dlaždice o rozměrech 300x300x80 mm. Celkem bylo vyrobeno 136 dlaždic, 4 hranoly a 54 krychlí.

Pro většinu experimentálních měření byla použita referenční receptura, která je standardně používaná 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 $2\,320\text{ kg.m}^{-3}$.

Tabulka B Receptura čerstvé betonové směsi – referenční beton

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

Tato receptura byla použita u projektů GAČR č. 103/09/0065 Omezení vzniku a rozvoje trhlin v betonových mostech a FAST-S-11-22 Ověření a určení možností stanovení a způsobu hodnocení kvality povrchových vrstev betonu. Receptura spolupráce s OHL ŽS, a.s. nebyla známá. Pouze se vědělo, že se jedná o provzdušněné betony. U dalších projektů byla přidávána vlákna Anti-crak v množství $0,6\text{ kg.m}^{-3}$.

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

4.4 VÝSLEDKY ETAPY 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, neboť zkušební přístroje vyžadují rovný povrch. 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 zrálá těmito způsoby:

- ve vlhkém prostředí při vlhkosti 95 % a teplotě $21\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$,
- 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 °C až 105 °C v délce 24 až 48 h (příp. více),
- nebo zkoušení při aktuální povrchové vlhkosti ihned po dosažení požadovaného stáří s jednodenním až třídním uložení v laboratorních podmínkách.

4.5 VÝSLEDKY ETAPY 5 – Experimentální měření

Etapa 5 popisuje cíle, z jakých důvodů bylo měření prováděno a jaké veličiny byly měřeny. Dále uvádí postupy provádění experimentálního měření a vyhodnocení naměřených dat v programu Microsoft Excel 2010.

Na zkušební betonové dlaždici se stanovila zkušební místa. Na prvním místě byla nejdříve změřena povrchová vlhkost w kapacitním vlhkoměrem Kakaso, protože povrchová vlhkost výrazně ovlivňuje propustnost betonu, dále byl stanoven součinitel vzduchové propustnosti k_T metodou TPT a nakonec byl na stejném místě měřen součinitel propustnosti tlakovou vodou k_1 metodou GWT. 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 $ISA_{10\text{ min}}$ a $ISA_{30\text{ min}}$ přístrojem ISAT.



Obrázek 2 Grafické znázornění postupu měření

4.6 VÝSLEDKY ETAPY 6 – Zhodnocení naměřených dat

4.6.1 Experimentální měření ve spolupráci s OHL ŽS, a.s.

4.6.1.1 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. s obsahem vzduchu 10 %) 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 ISA .

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_{30min} 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.

4.6.1.2 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 stárí na snížení propustnosti betonu při srovnatelné povrchové vlhkosti.

Naměřené hodnoty povrchové počáteční absorpce po 10 min ($ISA_{10\ min}$) dosahovaly průměrných hodnot 0,11 ml/m²/s, což spadá do kategorie nízké absorpce.

Přístrojem GWT byl změřen součinitel vnitřní propustnosti k_1 s průměrnou hodnotou $11,5 \cdot 10^{-6}$ m². Neplatná norma DIN 1045 považovala za trvanlivé betony ty, jejichž součinitel propustnosti $k_1 < 1,0 \cdot 10^{-16}$ m². Naměřená průměrná hodnota vnitřní propustnosti k_1 je 10krát horší a naměřené výsledky dosahují velkého rozptylu až jednoho řádu.

4.6.2 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 $ISA_{10\ min}$, $ISA_{30\ min}$ i $ISA_{60\ min}$, kde byly nejmladší betony hodnoceny absorpcí „vysokou“ a nejstarší betony absorpcí „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.

4.6.3 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 byla 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 měly 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 $ISA_{10\ min}$, $ISA_{30\ min}$ i $ISA_{60\ min}$. 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 w v rozsahu 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.

4.6.4 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.

4.6.5 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_T 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.

4.7 VÝSLEDKY ETAPY 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), FAST-J-10-96 (ve stáří 1 měsíc) 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 $ISA_{10\ min}$ 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_1 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 [5]. Referenční vlhkost 3% byla vybrána s ohledem na stav vlhkosti v praxi nejčastěji se vyskytujících betonů. Základní konverzní vztah byl stanoven následovně:

$$\alpha = \frac{\ln k_{T,w} - \ln k_{T,3}}{w - 3}, \text{ kde} \quad (1)$$

$k_{T,w}$... 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 (1) byl vyjádřen součinitel vzduchové propustnosti při 3% vlhkosti:

$$\ln k_{T,3} = \alpha(3 - w) + \ln k_{T,w}, \quad (2)$$

a jednoduchou úpravou z toho plyne exponenciální rovnice ve tvaru

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

která 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 R^2 , který vyjadřuje, kolik procent z celkové variability je vysvětleno regresní přímkou.

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

Ad. Závislost povrchové počáteční absorpci $ISA_{10 \text{ min}}$ na povrchové hmotnostní vlhkosti w 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 stáří.

Regresní model: $f(x) = a \cdot e^{bx}$ (4)

Přepočtový vztah: $ISA_{(10 \text{ min})_3} = ISA_{(10 \text{ min})_w} \cdot e^{a(3-w)}$, kde (5)

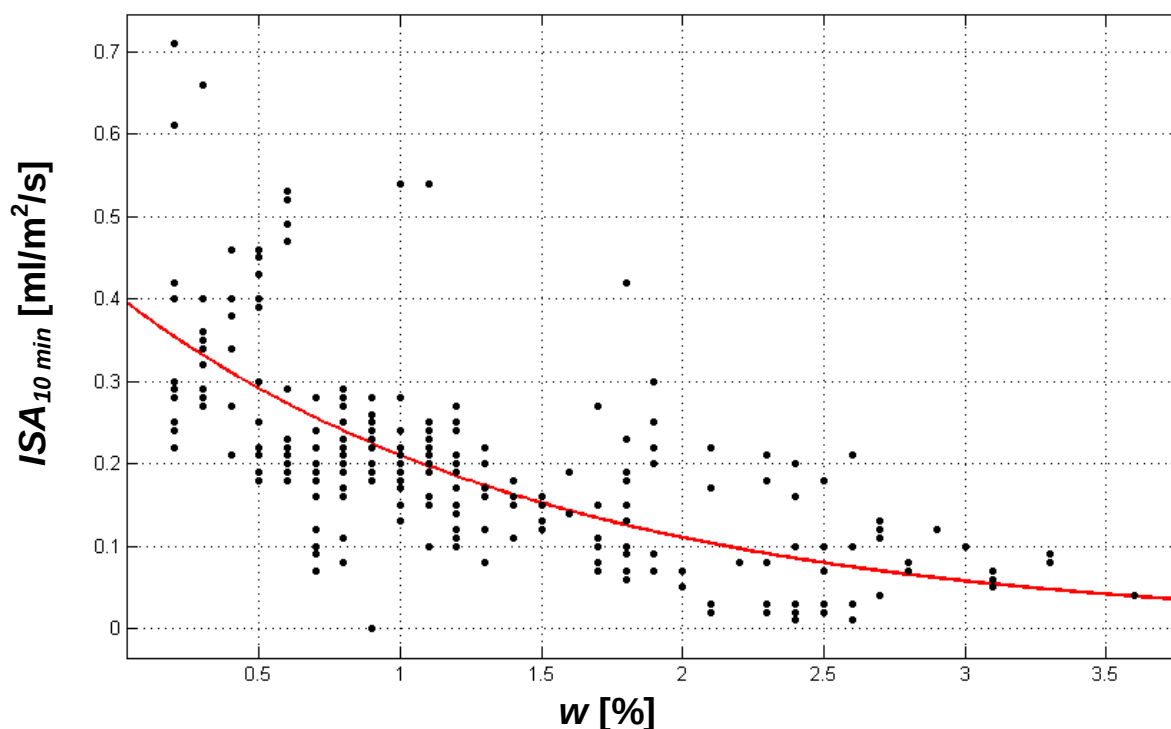
$ISA_{(10 \text{ min})_3}$... počáteční povrchová absorpce ISA po 10 min při srovnávací povrchové vlhkosti $w = 3 \text{ \%}$ [$\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$],

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

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

w ... aktuální povrchová vlhkost [%].

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



Obrázek 3 Závislost hodnoty $ISA_{10 \text{ min}}$ 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 .

Tabulka C Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{10 \text{ min}} - w$

Regresní koeficienty 95% intervalového odhadu:	$a = 0,4027 \text{ (0,3665; 0,439)}$ $b = -0,6484 \text{ (-0,7496; -0,5472)}$		
Věrohodnost modelu:			
Součet čtvercových chyb SSE:	1,862	Koef. determinace R^2 :	0,4763
Střední kvadratická chyba RMSE:	0,084	Upravený R^2 :	0,4743

Ad. Závislost povrchové počáteční absorpci $ISA_{30 \text{ min}}$ na povrchové hmotnostní vlhkosti w 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 stáří.

Regresní model: $f(x) = a \cdot e^{bx}$ (6)

Přepočtový vztah: $ISA_{(30 \text{ min})_g} = ISA_{(30 \text{ min})_w} \cdot e^{a(3-w)}$ (7)

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

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

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

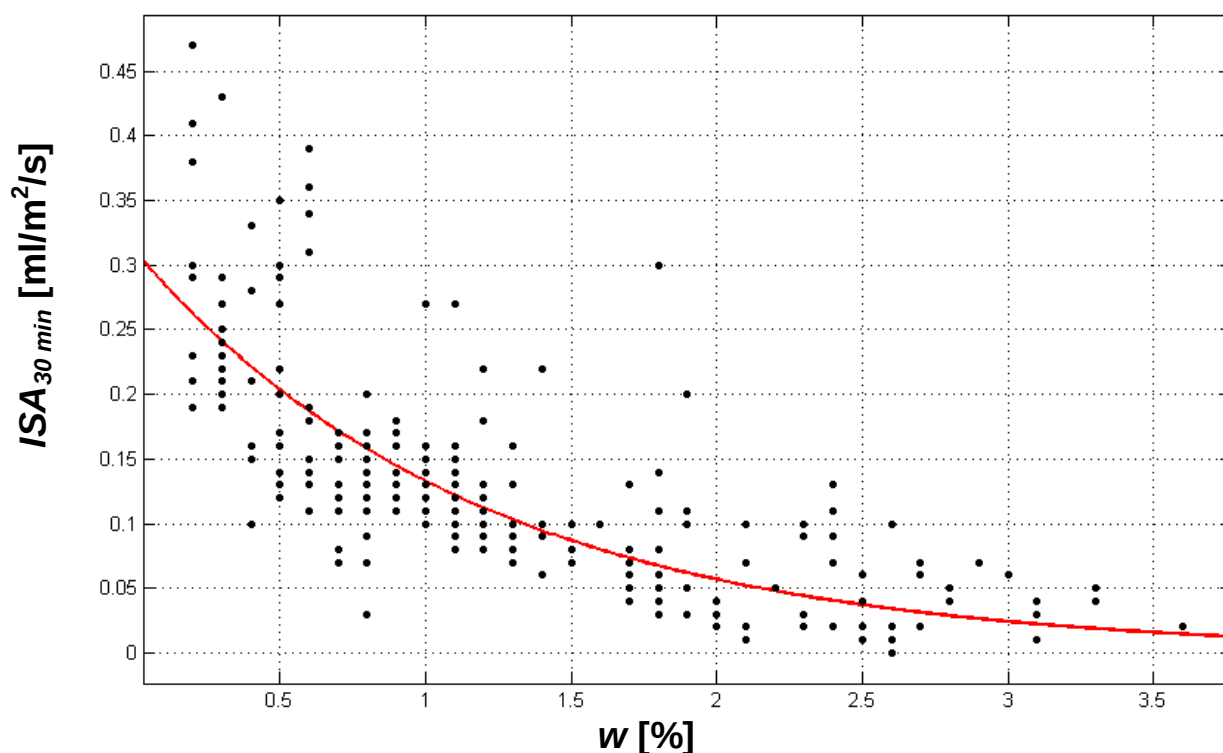
w ... aktuální povrchová vlhkost [%].

Následující tabulka uvádí spolehlivost regresního modelu, odchylky SSE, RMSE a také upravený i neupravený koeficient determinace R^2 .

Tabulka D Regresní koeficienty a věrohodnost modelu $ISA_{30 \text{ min}} - w$

Regresní koeficienty	$a = 0,3111 \text{ (0,2842; 0,338)}$		
95% intervalového odhadu:	$b = -0,8505 \text{ (-0,9599; -0,741)}$		
Věrohodnost modelu:			
Součet čtvercových chyb SSE:	0,749	Koef. determinace R^2 :	0,5838
Střední kvadratická chyba RMSE:	0,053	Upravený R^2 :	0,5822

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



Obrázek 4 Závislost hodnoty $ISA_{30\ min}$ na vlhkosti w ; bez ohledu na stáří

Závěrečná analýza dat

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

Tabulka E Přepočtové vztahy $ISA - k_T$

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

Tabulka F Přepočtové vztahy ISA – w

Stáří (v rámci výzkumu)	ISA _{10 min} – w		ISA _{30 min} – w	
	$ISA_{(10\ min)_3} = ISA_{(10\ min)_w} \cdot e^{a(3-w)}$ $ISA_{(30\ min)_3} = ISA_{(30\ min)_w} \cdot e^{a(3-w)}$			
	a	R ²	a	R ²
1 měsíc (FAST-J-10-96 a FAST-S-11-22)	0,1749	0,8042	0,1078	0,8936
1 rok (FAST-S-11-22)	0,3254	0,3679	0,2759	0,5381
2 roky (FAST-J-11-12)	0,4220	0,5771	0,2851	0,6472
nerozlišeno (FAST-J-10-96, FAST-J-11-12 a FAST-S-11-22)	0,4027	0,4763	0,3111	0,5838

5 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 jedná se o ucelený dokument pro komplexní hodnocení aktuální trvanlivosti betonu.

6 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 rozšíří 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 odhadnout 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.

7 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 přístrojem.

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 není možné výsledky 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 [9][10], 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.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ZARRAGA, C. E. *How does Permeability of Concrete affect its Durability?* 2008. Dostupné z www.grad.illinois.edu
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Přístroj pro měření permeability TORRENT – návod k použití.

- [8] Přístroj pro měření vodní propustnosti GWT – návod k použití, technický list.
- [9] Operating Instructions. Initial Surface Absorption Test. ELE International 2003.
- [10] BS 1881-208:1996 *Testing concrete. Recommendations for the determination of the initial surface absorption of concrete.*
- [11] Semerák P. *Kapacitní vlhkoměr PSMXi – hygrometer operating instructions*, Praha, 2008.

9 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Ing. Zlata Kadlecová

Datum a místo narození: 16. 06. 1983

Trvalé bydliště: Dufkovo nábřeží 179/10, 619 00 Brno

Dosažené vzdělání:

1998–2002 SPŠ stavební Brno, obor: Obnova budov

2002–2007 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Obor: Pozemní stavby – Navrhování pozemních staveb, získán titul inženýr

2005–2008 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Obor: Stavebně materiálové inženýrství, získán titul inženýr

2008–dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorský studijní program, Obor: Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, Státní doktorská zkouška absolvována dne 1. 10. 2010

Pracovní zkušenosti:

2009–2011 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, technik

2011–dosud externí doktorand

Publikační činnost:

Časopisy, knihy

- [1] HRONOVÁ, P.; KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J. Porovnání vlivu vodního součinitele a různých typů vláken na vznik trhlin v raném věku betonu. *TZB-info*. ISSN 1801-4399, Topinfo s.r.o., Praha, 2013.
- [2] KADLECOVÁ, Z.; ADÁMEK, J.; HRONOVÁ, P. Využití metody Torrent Permeability Tester pro kontrolu kvality povrchové vrstvy betonových konstrukcí. *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.
- [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

- [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.
- [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 *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví. 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 *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví. 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 *Konference zkoušení a jakost ve stavebnictví. 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.
 - [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 Interantional 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: 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. In *Betonářské dny 2010*. ISBN 978-80-8076-089-2, Bratislava, 2010.
 - [20] Odehnalová, P.; Kadlecová, Z.; Adámek, J. Hodnocení povrchové vrstvy betonu zkouškami propustnosti. In *Betonářské dny 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. In *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. In *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. In *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.
- [27] KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ŠTAINBRUCH, J. Location of Steel Reinforcement and Other Reinforcing Elements using 3D GPR. In *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. In *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.

10 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.