



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | |
|---|--------------|----------------------|
| Příjmení: Schůtová | Jméno: Petra | Osobní číslo: 426317 |
| Zadávací katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb | | |
| Studijní program: Budovy a prostředí | | |
| Studijní obor: Budovy a prostředí | | |

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

| | |
|--|---|
| Název diplomové práce: Nasákavost stavebních materiálů – laboratorní metody a měření | |
| Název diplomové práce anglicky: Water capillary uptake of building materials – laboratory methods and measurements | |
| Pokyny pro vypracování: Diplomová práce bude zaměřena na laboratorní metody měření nasákavosti stavebních materiálů. Bude provedena rešerše používaných laboratorních metod. Na vybraných stavebních materiálech bude provedeno měření nasákavosti v laboratořích UCEEB ČVUT v Praze a UPV ve Španělsku v rámci studijního pobytu Erasmus+. Výsledky budou porovnány s publikovanými metodami a budou stanoveny nejistoty měření. | |
| Seznam doporučené literatury: Carl-Eric Hagentoft - Introduction to Building Physics | |
| Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamil Staněk, Ph.D. | |
| Datum zadání diplomové práce: 3.7.2019 | Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i> |
| Podpis vedoucího práce | Podpis vedoucího katedry |

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

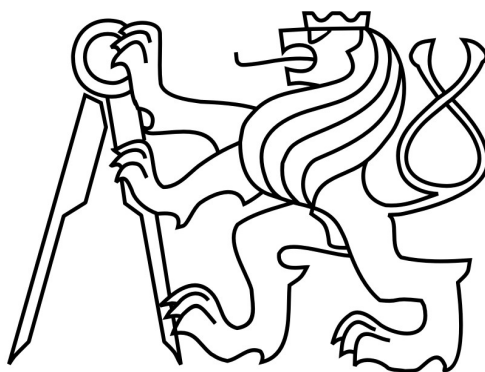
Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské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

| | |
|-----------------------|---------------------|
| Datum převzetí zadání | Podpis studenta(ky) |
|-----------------------|---------------------|

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Diplomová práce

Prohlašuji, že jsem tuto magisterskou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Kamila Staňka, Ph.D. a Arch. Gracii M^a López Patiño, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu magisterské práce Ing. Kamilu Staňkovi, Ph.D. za odborné vedení a individuální přístup při zpracovávání diplomové práce v ČR, i ve Španělsku. Velké poděkování patří především Ing. Janu Richterovi za velkou pomoc při řešení problémů, podporu a konzultace. Dále vedoucí práce Arch. Gracii M^a López Patiño, Ph.D. za aktivní přístup a ochotu při zpracovávání části diplomové práce na UPV ve Španělsku.

Taktéž bych ráda poděkovala technikům v laboratořích UCEEB a UPV, jmenovitě především Ing. Janu Vítovci a Ing. Radimu Havlíčkovi za precizní výrobu vzorků, velkou ochotu a trpělivost a také Ing. José Rafaelu Molina Nieto za velkou pomoc v laboratoři UPV.

Dále děkuji také Univerzitnímu centru energeticky efektivních budov UCEEB ČVUT a především prof. Ing. Janu Tywoniakovi CSc. za poskytnutí prostor laboratoří pro naměření experimentů.

Díky patří také firmám za poskytnutí materiálů pro účely této práce, a to: Josefu Havlíkovi z firmy M.T.A. spol. s r.o., Ing. Janu Barešovi z firmy EKOPANELY SERVIS s.r.o., Ing. Davidu Horovi z firmy IZOLACE KONOPÍ CZ, s.r.o., Ing. Lence Škaloudové z firmy JUTA a.s.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala rodičům za umožnění studia na vysoké škole a podporu v průběhu celého studia.

**Nasákavost stavebních materiálů –
laboratorní metody a měření**

Water capillary uptake of building materials –
laboratory methods and measurements

Anotace:

Diplomová práce se zabývá nasákavostí stavebních materiálů. Pro pochopení dané problematiky byla v úvodní části nastudována teorie šíření vlhkosti v konstrukcích a zpracována rešerše používaných laboratorních metod měření nasákavosti. Praktická část se zabývá nasákavostí konkrétních materiálů a aspekty, které tuto nasákavost ovlivňují. Bylo provedeno měření nasákavosti v laboratořích UCEEB ČVUT v Praze a UPV ve Valencii ve Španělsku. Výsledky těchto měření jsou porovnány s publikovanými metodami a jsou stanoveny nejistoty měření. Následně je ověřena důležitost přesnosti měření v programu WUFI.

Klíčová slova: *Přenos vlhkosti, nasákavost, tepelné izolace, přírodní materiály, laboratorní měření, nejistoty, mezilaboratorní porovnání*

Abstract:

The diploma thesis deals with the water capillary uptake of building materials. To understand the issue, the theory of moisture transfer in a porous material has been studied. The recherche of used laboratory methods of measurement has been processed in the first part of the thesis. The practical part of the thesis is focused on the measurement of water absorption of specific building materials and on aspects, that influence this property. The measurement has been carried out on selected building materials in the laboratory of UCEEB CTU in Prague and UPV in Spain. The results have been compared with the published methods and uncertainties have been determined. Subsequently, by the program WUFI, the importance of the accuracy of the measurement has been verified.

Keywords: *Moisture transport, watter capillary uptake, thermal insulation, natural materials, laboratory measurement, review, uncertainty, round robin test*

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých symbolů | 3 |
| Seznam použitých zkratk..... | 3 |
| A. TEORETICKÁ ČÁST | 4 |
| 1 Úvod..... | 4 |
| Introduction | 6 |
| 2 Fyzikální principy | 8 |
| 2.1 Vlhkost v porézních materiálech..... | 8 |
| 2.2 Transport vlhkosti v porézních materiálech..... | 9 |
| 2.3 Transport kapalně vody..... | 9 |
| 3 Metody měření a zpracování dat | 12 |
| 3.1 Legislativa | 13 |
| 3.2 Stanovení nasákavosti ručními metodami..... | 13 |
| 3.2.1 Částečné ponoření | 14 |
| 3.2.2 Úplné ponoření | 15 |
| 3.3 Ostatní metody měření | 16 |
| 3.3.1 Metody měření v terénu a starší metody měření | 16 |
| 3.3.2 Nové metody měření | 18 |
| 3.4 Metody zpracování dat A_{cap} | 21 |
| 3.4.1 Lineární regrese (jedno-tečná metoda)..... | 21 |
| 3.4.2 Modifikovaná lineární regrese | 22 |
| 3.4.3 Dvou-tečná metoda | 23 |
| 3.4.4 Jednobodová metoda | 23 |
| 3.4.5 Hallova metoda | 24 |
| 3.4.6 F – J metoda | 25 |
| 3.5 Metoda zpracování w_{cap} | 26 |
| B. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 28 |
| 4 Cíl práce | 28 |
| 5 Použité materiály, metody měření a zpracování dat..... | 28 |
| 5.1 Materiály | 28 |
| 5.1.1 Kalcium-silikát..... | 29 |
| 5.1.2 Dřevovláknó | 30 |
| 5.1.3 Konopí..... | 31 |
| 5.2 Posuzované ovlivňující faktory | 32 |
| 5.2.1 Velikost vzorků | 33 |
| 5.2.2 Způsob izolování vzorků..... | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2.3 | Počáteční vlhkost..... | 34 |
| 5.2.4 | Sušení vzorků | 35 |
| 5.2.5 | Způsob uložení vzorků..... | 36 |
| 5.3 | Použité metody měření..... | 36 |
| 5.3.1 | Metoda měření pro syntetické materiály..... | 37 |
| 5.3.2 | Metoda pro přírodní vláknité materiály – návrh postupu..... | 37 |
| 5.4 | Použité metody zpracování dat a metody porovnání výsledků | 39 |
| 5.4.1 | Metoda zpracování dat A_{cap} a w_{cap} | 39 |
| 5.4.2 | Způsob stanovení nejistoty měření..... | 39 |
| 6 | Výsledky měření nasákavosti, porovnání a diskuze..... | 49 |
| 6.1 | Kalcium-silikát | 49 |
| 6.1.1 | Výsledky měření | 49 |
| 6.1.2 | Porovnání a diskuze | 55 |
| 6.2 | Přírodní vláknité materiály..... | 64 |
| 6.2.1 | Diskuze..... | 64 |
| 6.3 | Dřevovláknó..... | 65 |
| 6.3.1 | Výsledky měření | 65 |
| 6.3.2 | Porovnání a diskuze | 67 |
| 6.4 | Konopí..... | 71 |
| 6.4.1 | Výsledky měření | 71 |
| 6.4.2 | Porovnání a diskuze | 74 |
| 6.5 | Shrnutí výsledků A_{cap} a porovnání měřených materiálů..... | 76 |
| 7 | Praktické využití výsledků měření CS | 78 |
| 7.1 | Simulace absorpčního testu..... | 78 |
| 7.2 | Vliv okrajových a počátečních podmínek..... | 79 |
| 7.3 | Porovnání modelů křivek nasákavosti CS z mezilaboratorního porovnání | 80 |
| 7.4 | Použití dat v modelové konstrukci | 81 |
| 7.5 | Výsledky simulace a diskuze | 83 |
| 8 | Závěr..... | 88 |
| | Conclusion | 90 |
| | Citatce..... | 92 |
| | Seznam obrázků | 95 |
| | Seznam tabulek..... | 98 |

Seznam použitých symbolů

| | | |
|-----------|---|---|
| A | [m ²] | plocha |
| A_{cap} | [kg/m ² · s ^{1/2}] | absorpční koeficient |
| c | [J/kg K] | měrná tepelná kapacita |
| φ | [-] | relativní vlhkost |
| κ | [m ² /s] | součinitel vlhkostní vodivosti |
| Kn | [-] | Knudsenovo číslo |
| m | [kg] | hmotnost |
| m_{wet} | [kg] | hmotnost vlhkého vzorku |
| m_{dry} | [kg] | hmotnost suchého vzorku |
| λ | [W/m K] | součinitel tepelné vodivosti |
| μ | [-] | faktor difúzního odporu |
| p | [Pa] | tlak |
| r | [m] | poloměr pórů/trubice |
| RH | [%] | relativní vlhkost |
| ρ | [kg/m ³] | objemová hmotnost materiálu |
| σ | [N/m] | povrchové napětí kapaliny |
| t | [s] | čas |
| T | [K] | teplota |
| u | [kg/kg] | hmotnostní vlhkost |
| w | [m ³ /m ³] | objemová vlhkost |
| θ | [-] | stupněm nasycení |
| θ' | [°] | úhel kontaktu mezi vodním meniskem a stěnami trubky |
| w_{cap} | [kg/m ³] | nasyčený obsah kapilární vlhkosti |
| w_{sat} | [kg/m ³] | obsah vlhkosti zcela nasyceného vzorku |
| ψ | [%] | pórovitost |

Seznam použitých zkratek

| | |
|-------|---|
| UCEEB | Univerzitní centrum energeticky efektivních budov |
| UPV | Universitat Politècnica de València |
| ÚTAM | Ústav teoretické a aplikované mechaniky |

A. TEORETICKÁ ČÁST

1 Úvod

Vlhkost je jedna z klíčových otázek ve stavebnictví, protože je obsažena v podstatě ve všech stavebních pórovitých materiálech a ovlivňuje mnoho dalších charakteristik materiálu, jako např. tepelnou vodivost, akumulaci schopnosti, pevnost, objemovou hmotnost, deformace atd. S vlhkostí související procesy bývají častým zdrojem poruch a ovlivňují především funkčnost a životnost konstrukcí, energetickou účinnost budov, ale také vnitřní prostředí, jeho hygienické parametry a kvalitu ovzduší.

Pro analýzu přenosu vlhkosti a míry dopadu přítomné vlhkosti v konkrétních konstrukcích je nutné znát vlastnosti materiálů, které jsou použity jako vstupní parametry výpočtových modelů. Kromě toho výsledky zkoušek měření materiálových vlastností jsou jedním z podkladů pro získávání srovnatelných hodnot umožňujících specifikaci a kontrolu jakosti materiálů.

Nicméně mnoho mezilaboratorních zkoušek odhalilo, že výsledky měření materiálových vlastností a zejména vlhkostních vlastností měřených na stejných materiálech, ale v různých laboratořích, se mohou výrazně lišit. Aktuálně dostupné databáze těchto vlastností nejsou zcela spolehlivé. [1]

I porovnání výsledků měření konkrétně nasákavosti v různých laboratořích podle normy ukázalo, že vývojové a normové postupy a další práce jsou opravdu nezbytné. [2]

Je samozřejmé, že žádné, jakkoliv precizní měření není zcela bez chyb. Ale protože v podstatě celá struktura a aplikace vědy závisí na měřeních, je zásadně důležité vyhodnotit tyto chyby a nejistoty měření a udržet je na minimu. Bez informací o nejistotě existuje riziko buď nadhodnocení, nebo podhodnocení výsledků. Nesprávná rozhodnutí přijatá na takovém základě mohou vést ke zbytečným výdajům v průmyslu, neoprávněným soudním žalobám nebo nepříznivým zdravotním nebo sociálním důsledkům. [3]

Zároveň se postupně stává stále aktuálnější otázka ochrany životního prostředí a snižování spotřeby energie. Současné vývojové trendy se opět vrací k využívání přírodních surovin, rozšiřuje se sortiment a zvyšuje se poptávka. Přírodní materiály jsou ale stále obecně vnímány jako alternativní zdroje, v laboratořích je jim věnováno stále poměrně málo prostoru, výrobci udávají neúplné nebo ne zcela spolehlivé údaje o vlastnostech a v normách většinou nejsou dostatečně specifikovány postupy a požadavky na měření jejich materiálových vlastností, čímž toto měření zůstává problematické, a především u vláknitých materiálů bývají výsledky

zatíženy velkou chybou. Neznalost přesných vlastností vede k nemožnosti podchycení některých problémů spojených s používáním v konstrukcích a k větší nedůvěře k těmto materiálům, přestože mají oproti syntetickým materiálům mnoho nesporných výhod.

Tato práce se snaží reagovat na všechny výše zmíněné problémy. Stanovuje nasákavost absorpčním testem třech tepelněizolačních materiálů, z toho dvou přírodních vláknitých izolanů, pro které je snaha navrhnout vhodnou metodu měření.

Experimenty probíhaly ve dvou laboratořích, výsledky jsou porovnány s výsledky z publikovaného článku od současných předních stavebních fyziků v oblasti vlhkostních vlastností stavebních materiálů, Chi Fenga a Hanse Janssena. Jsou stanoveny nejistoty měření a je snaha analyzovat mezilaboratorní chyby.

Kromě toho se tato práce snaží zjistit míru dopadu některých ovlivňujících faktorů měření a navrhnout vhodné úpravy oproti požadavkům v normě. V závěru práce jsou výsledky použity jako vstupní parametry pro počítačovou simulaci a je zjišťována důležitost přesnosti měření materiálových vlastností pro tyto účely.

Introduction

Moisture is one of the key issues in the construction industry because it is contained in all porous building materials and it affects many other material characteristics such as thermal conductivity, thermal storage capacity, strength, bulk density, deformation etc. Moisture-related processes are often a source of failures and affect mainly the functionality and durability of structures, the energy efficiency of buildings, but also the internal environment, its hygienic parameters and air quality.

For the analysis of moisture transfer and the impact of moisture present in particular constructions, it is necessary to know the properties of the materials used as input parameters of the calculation models. Additionally, the results of the Material Characteristics Tests are one of the bases for obtaining comparable values that allow specification and quality control of materials.

However, many interlaboratory tests revealed that the results of measurements of material properties, and in particular of moisture properties measured on the same materials, but in different laboratories, may vary significantly. The currently available databases of these properties are not entirely reliable. [1] This demonstrates that the measurement procedures, data control and processing conditions are not sufficiently specified, and more detailed information is required

Comparing the measurement results specifically with water absorption in different laboratories according to the standard has shown that development and standard procedures and other work are really necessary. [2]

Certainly, any measurement, no matter how precise it is, can not be completely without failures. It is crucially important to evaluate these errors and uncertainties of measurement and keep them to a minimum because almost the entire structure and application of science depend on measurements. There is a risk of either overestimating or underestimating the results without information about uncertainties. Incorrect decisions taken on this basis may lead to unnecessary costs in the industry, unjustified legal action or adverse health or social consequences. [3]

Simultaneously, the issue of protecting the environment and reducing energy consumption is becoming more and more relevant. Current trends are returning to the use of natural raw materials. The materials available on the market are expanding and demand of them is increasing. However, natural materials are still generally perceived as alternative sources. These materials are still just a small part of research in laboratories. Manufacturers give incomplete or not completely reliable data of their properties. In standards, the procedures and

requirements for measuring their material properties are usually not specified. Due to these issues, the measurement remains problematic. Especially for fibrous materials, the results are burdened by big mistakes. Ignorance of the precise properties leads to the inability to capture some problems associated with the utilization in the constructions. Due to this, there is a distrust of these materials, although they have many advantages over synthetic materials.

This work tries to respond to all the above-mentioned problems. It determines the absorption test of three thermal insulating materials. Two of them are natural fibre thermal insulating materials, for which it is an effort to design a suitable method of measurement. The experiments were conducted in two laboratories. The results are compared with the results from a published article from Chi Feng and Hans Janssen. The uncertainties of measurements are determined. The analyze of interlaboratory errors has carried out.

In addition, this work determines the impact of some influencing factors of measurement. According to the influence, It attempts to propose appropriate adjustments to the requirements of the standard. At the end of the thesis, the results are used as input parameters for computer simulation. The importance of the accuracy of the measurement of material properties for these purposes is determined.

2 Fyzikální principy

V následujících kapitolách budou stručně popsány základní fyzikální principy vlhkostních procesů v porézních materiálech, které jsou dále aplikovány v experimentální části práce.

2.1 Vlhkost v porézních materiálech

Voda existuje ve 3 skupenstvích: pevné skupenství, kapalné a plynné. Budovy a stavební materiály se mohou dostat do styku se všemi třemi formami.

Zdroje vlhkosti ovlivňující budovy a stavební materiály:

- Vlhkosti vzduchu
- Vlhkost v konstrukcích
- Srážky
- Defekty
- Zemní vlhkost

Stavební materiály běžně tvoří kombinace matrice materiálu a komplexní struktura otevřených nebo uzavřených pórů. Přítomnost otevřených pórů zapříčiňuje pronikání vlhkosti do stavební konstrukce, ať už v kapalném stavu, nebo v podobě vodní páry.

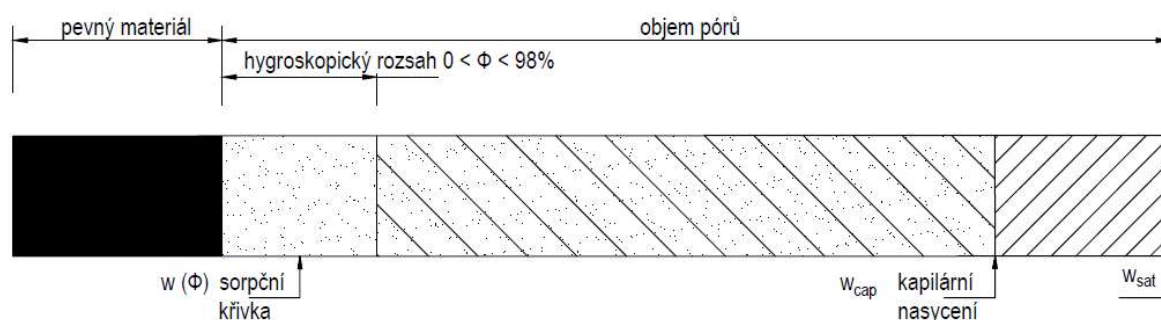
Tyto póry ovlivňují kromě průběhu vlhkostních procesů i fyzikálně mechanické vlastnosti materiálu. Zásadní jsou také rozměry pórů, protože právě jejich velikost ovlivňuje, zda je materiál zaplňován vodou, nebo plynem.

Obsah vlhkosti v materiálu lze vyjádřit nejčastěji pomocí hmotnostní vlhkosti u [kg/kg], objemové vlhkosti w [m³/m³], nebo stupněm nasycení θ [-].

Posoudit v jakém skupenství se voda v jednotlivých pórech vyskytuje, lze pomocí Knudsenova čísla Kn [-].

Existuje limit množství vlhkosti uložené v materiálu, zachycené z okolního vlhkého vzduchu při izotermických podmínkách. Tento hygroskopický rozsah je přibližně v rozmezí od 0 do 98 % relativní vlhkosti. Na strukturu pórů může být zachycena další značná část vody, pokud je materiál v kontaktu s kapalnou vodou. Horní mez obsahu vlhkosti materiálu, který je v kontaktu s kapalnou vodou, je označen jako w_{cap} [kg/m³]. Zde "cap" znamená kapilárně nasycený materiál.

Maximální možný obsah vody v materiálech, tzn. když jsou všechny póry naplněny vodou, se označuje w_{sat} [kg/m³]. [4] [5]



Obr. 1: Poměr matrice ku objemu pórů a odpovídající množství uložené vody v materiálu (inspirováno [4])

2.2 Transport vlhkosti v porézních materiálech

Vlhkost se v porézních stavebních hmotách pohybuje kombinací toku vodní páry a kapalné vlhkosti, které mají složité vzájemné vlivy s teplotními a vlhkostními spády.

Póry mohou být prázdné, částečně naplněné nebo zcela zaplněné kapalnou vodou.

Pokud je relativní vlhkost poměrně nízká, tzn. není dostatečně velká na to, aby na stěnách pórů začala kondenzovat voda, je vlhkost přenášena pouze difúzí.

V případě částečného naplnění pórů vodou, tzn. při vyšší vlhkosti vzduchu, se jedná o kombinaci procesu difúze a kapilární nasákavosti. Při izotermních podmínkách způsobuje zvyšující se kapalný tok exponenciální nárůst difuzní vodivosti.

Pokud jsou póry zcela zaplněny kapalnou vodou, přenos je způsoben kapilární nasákavostí. [4] [2]

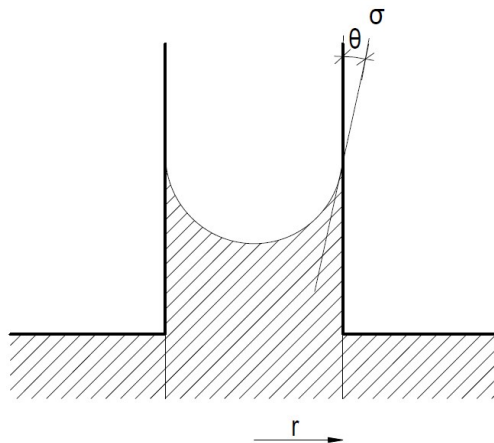
2.3 Transport kapalné vody

Tato práce se zabývá nasákavostí stavebních materiálů, tedy transportem kapalné fáze vody, ke které může v praxi dojít vlivem srážek (větrem hnaný déšť), při defektu (např. prasknutí vodovodního rozvodu), nebo pro materiály v kontaktu se zemínou, vztlínáním zemní vlhkosti.

V podstatě ve všech případech, až do dosažení plného nasycení vodou w_{sat} , je v materiálu obsažena do jisté míry i plynná složka. Proces kapilární nasákavosti je ale mnohem rychlejší a silnější než difúze, proto je pro usnadnění výpočtů uvažován transport pouze složky kapalné.

Pokud tedy dojde ke kontaktu porézního materiálu s kapalnou vodou, dochází k vzestupu kapalné vody soustavou pórů materiálu.

To lze snadno vysvětlit na příkladu malé trubice v kontaktu s vodou. Voda v trubičce vystoupá nad hladinu okolní vody. To je způsobeno právě kapilární nasákavostí, která má své fyzikální vysvětlení v přitažlivosti mezi molekulami vody a stěnami trubičky a jevem povrchového napětí.



Obr. 2: Trubice v kontaktu s volnou hladinou vody (inspirováno [4])

Sání, tj. podtlak pod vodním meniskem je dán následujícím výrazem:

$$p = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos(\theta') \quad [\text{Pa}], \quad (2.3-1)$$

kde r [m] je poloměr trubice, σ [N/m] je koeficient povrchového napětí a θ' [°] úhel kontaktu mezi vodním meniskem a stěnami trubky. U běžných stavebních materiálů se tento úhel přibližně rovná nule a koeficient povrchového napětí při 20 °C je 0,073 N/m.

Voda nasákavostí vystoupá v trubici na úroveň, kde existuje rovnováha mezi kapilární a gravitační silou. Za předpokladu, že kontaktní úhel je rovný nule, lze vztah napsat jako:

$$Hg\rho_w = p = \frac{2\sigma}{r} \quad \rightarrow \quad H = \frac{2\sigma}{gr\rho_w}, \quad (2.3-2)$$

kde H [m] je výška vystoupané vody, g [kg/m²] je tíhové zrychlení a ρ_w je hustota vody.

Následující tabulka udává tuto výšku jako funkci poloměru trubice. Přestože jsou tyto výpočty odpovídající pro válcové trubky, lze je použít jako odhad pro porézní materiály. V materiálech s póry o velmi malých poloměrech v řádu desetin mikrometru, může voda vystoupat až do výšky stovek metrů. Materiály s většími póry jako například šterk, nasáknou vodu rychleji, ale výška vzlinutí je nižší, pouze v řádu centimetrů.

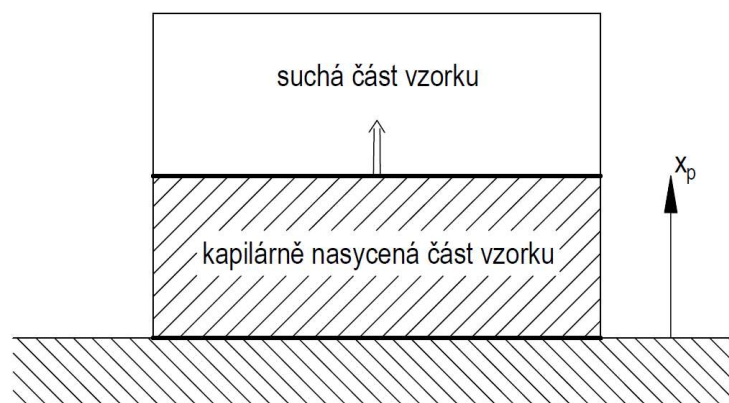
| r [m] | H [m] |
|-----------|-------|
| 10^{-3} | 0,015 |
| 10^{-4} | 0,15 |
| 10^{-5} | 1,5 |
| 10^{-6} | 15 |
| 10^{-7} | 150 |

Tab. 1: Výška vody v trubici jako funkce poloměru

Toto je důležité pro hrubý odhad množství vody, které může suchý materiál nasát.

U starších konstrukcí vystavených působení zemní vlhkosti je vzlínavost častým problémem, např. u starších cihelných objektů je zdivo často vlhké do výšky až přes jeden metr, což odpovídá výpočtům. Střední průměr rozměru pórů je u běžných cihel přibližně 10^{-5} m – čemuž z tabulky odpovídá výška vzlinutí 1,5 m. [4] [6]

Následující obrázek znázorňuje suchý materiál, který je v čase nula v kontaktu s vodou.



Obr. 3: Sání vody suchým vzorkem (inspirováno [4])

V současné době se nasákavost běžně určuje experimentálně. Jeden z nejčastějších experimentů je absorpční test, ze kterého se určí absorpční koeficient pro kapalnou vodu A_{cap} [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$] a nasycený obsah kapilární vlhkosti w_{cap} [kg/m^3].

Absorpční koeficient je obecně definován jako tangenta nárůstu kumulovaného obsahu vody poděleného odmocninou z času během 1. fáze kapilární nasákavosti.

Kumulativní přírůstek hmotnosti lze vyjádřit rozdílem hmotnosti vlhkého a suchého vzorku, vztaženo na spodní plochou vzorku, která je v kontaktu s vodou.

$$\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} \quad [\text{kg}/\text{m}^2], \quad (2.3-3)$$

Proces kapilární absorpce materiálů lze znázornit křivkou nasákavosti – vykreslením kumulativního přírůstku v závislosti na odmocnině z času.

Alternativně lze odvodit z absorpčního testu také sorptivitu S [$\text{m/s}^{1/2}$]. Absorpční koeficient a sorptivita jsou vzájemně závislé a analýzu lze aplikovat obdobně.

$$A_{cap} = S \cdot \rho_w \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}], \quad (2.3-4)$$

Absorpční koeficient pro vodu však podává informace pouze o vlhkostním toku v 1D, ale neříká nic o distribuci vlhkosti v materiálu v prostoru. Transport kapalně vlhkosti pro všechny směry lze popsat vlhkostním tokem:

$$\vec{J} = -\rho_m \kappa \nabla w \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}], \quad (2.3-5)$$

kde κ je součinitel vlhkostní vodivosti, w je hmotnostní vlhkost a ρ_m hustota matrice. Přímo aplikací rovnice pro výpočet vlhkostního toku lze získat vztah pro průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti:

$$\kappa = D_w \approx \left(\frac{A_{cap}}{w_{cap}} \right)^2 \quad [\text{m}^2/\text{s}]. \quad (2.3-6)$$

Součinitel vlhkostní vodivosti lze použít v parciální diferenciální rovnici:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_w \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad [\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}], \quad (2.3-7)$$

kde x je prostorová souřadnice [m]. Podrobněji lze transport kapalně vlhkosti popsat pomocí nelineární difúzní rovnice:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(\kappa(w) \text{grad } w), \quad (2.3-8)$$

kde součinitel vlhkostní vodivosti κ je zaveden jako funkce obsahu vlhkosti. [6] [7] [8] [9]

3 Metody měření a zpracování dat

Problematikou stanovení absorpce kapalně vody se zabývá řada norem, které určují stanovení nasákavosti různých materiálů. Metody měření se od sebe liší většinou požadavky na velikost vzorků, dobu měření, způsob vyhodnocení apod., podle konkrétních specifik materiálů a účelu měření, ale princip měření bývá ve většině případů stejný.

Následuje výpis nejdůležitějších norem, které se tohoto tématu týkají a poté jsou vypsány používané postupy měření.

3.1 Legislativa

Experimentální podmínky a postupy v této práci jsou převážně stanoveny na základě normy ČSN EN ISO 15148. Je ale nutné zmínit, že ne všechny požadavky jsou přesně dodrženy. Konkrétní nuance oproti normě jsou popsány a zdůvodněny hlavně v kapitolách 5.2 a 5.3.

Norma ČSN EN ISO 15148: Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení nasákavosti částečným ponořením, je českou verzí evropské normy EN ISO 15148:2002. Slouží k určení intenzity nasákavosti na základě kapilárních sil z nepřetržitého nebo hnaného deště, nebo v případech během krátkodobého uložení izolačních nebo stavebních hmot na staveništi při stavební přestávce. Postup není zaměřený na hodnocení nasákavosti materiálů používaných pod vodou nebo v kontaktu s nasáklou zemínou, kde je vhodnější zkouška celkového ponoření. [2]

Zkoušku úplného ponoření popisuje několik norem opět pro různé materiály: např. ČSN 64 5421 pro stanovení nasákavosti lehčených hmot, ČSN EN 13755 popisující zkušební metody přírodního kamene, nebo pro tepelněizolační výrobky platí norma ČSN EN 12087.

Tepelněizolačními výrobky a jejich nasákavostí se zabývá také norma ČSN EN 1609. Tato norma stanovuje zkoušku částečným ponořením, což simuluje nasákavost vody způsobené deštěm po dobu 24 h během stavebních prací. [10] [11]

Přestože je experimentální část této práce zaměřena na stanovení nasákavosti tepelných izolací, nejsou postupy popsané v těchto normách pro její účely vhodné, a proto se jimi neřídí. Práce se totiž zaměřuje na stanovení dynamické nasákavosti v čase pro využití dat jakožto vstupních parametrů pro počítačové simulace.

Kromě zmíněných existují další normy stanovující nasákavost například zdících prvků, prefabrikovaných betonových výrobků, umělého kamene, kameniva, lepidel a spárovacích malt pro keramické obkladové prvky, plastů atd.

3.2 Stanovení nasákavosti ručními metodami

Ruční stanovení nasákavosti je zatím nejběžnějším způsobem, který je popsán v normách pro různé materiály. Podle konkrétního materiálu a účelu využití se postupy různí – může se jednat o stanovení částečným, nebo úplným ponořením a oba způsoby mohou být stanoveny pro krátkodobou nebo dlouhodobou nasákavost.

Následující postupy citují výše zmíněné normy bez ohledu na jejich vhodnost použití.

3.2.1 Částečné ponoření

Tento postup předepisuje mimo jiné zmíněná norma ČSN EN ISO 15148. Norma popisuje ruční metodu krátkodobé nasákavosti bez teplotního spádu. Následující postup cituje normu bez ohledu na úpravy, které byly provedeny pro měření v této práci.

Zkušební vzorky musí být reprezentativní pro materiál a výrobek a musí mít pravidelný tvar se stálým průřezem k zajištění jednotného dimenzovaného průtoku vody. Styčná plocha každého zkušební vzorku s vodou musí být až na výjimky alespoň 50 cm², ale je normou doporučeno použít vzorky s čelní plochou alespoň 100 cm², protože mají podle normy vést k větší přesnosti – pokud je tento požadavek dodržen, zkouší se minimálně tři vzorky, pokud je ale plocha jednotlivých vzorků menší, musí se zkoušet nejméně šest vzorků. Tloušťka by měla odpovídat, pokud možno, plné výrobní tloušťce.

Hrany tuhého vzorku musí být opatřeny vodotěsným a parotěsným materiálem, který nesmí chemicky reagovat. Vzorky se kondicionují při zkušebních podmínkách, což odpovídá teplotě 23 ±5 °C s dovolenou odchylkou během zkoušky ±2 °C a 50 ±5 % relativní hmotnosti s dovolenou odchylkou ±5 %.

Zkušební vzorek se váží s přesností ±0,1 % jeho hmotnosti, aby se určila počáteční hmotnost po kondicionování. Poté se vzorek uloží do nádrže naplněné vodou z vodovodu tak, že jeho základ leží na opěrných bodech volně nad dnem nádrže. Hladina vody musí být během zkoušky konstantní na 5 ±2 mm nad nejvyšším místem spodní strany vzorku.

Jakmile se vzorek ponoří do vody, zapne se časoměřič. Po asi 5 minutách se vzorek vytáhne z vody, povrch se osuší vlhkou houbou, pak se zváží s přesností ±0,1 % jeho hmotnosti. Tento postup se opakuje v intervalech 20 minut, 1 h, 2 h, 4 h a 8 h po ponoření a pak se po minimálně dvojnásobné době včetně 24 h stanoví řada hmotností m_t při časech t . Když se voda objeví na horním povrchu zkušební vzorku, zkouška se musí ukončit. [2]

V případě tepelných izolací se stanovuje krátkodobá/dlouhodobá nasákavost vody při částečném ponoření podle normy ČSN EN 1609, respektive 12087 měřením změny hmotnosti zkušební vzorku, jehož spodní část je ve styku s vodou po dobu 24 hodin/28 dní. Přebytečná voda ulpívající na povrchu se buď odstraní odkapáním, nebo se zahrne do výpočtu odečtením počátečního zvlhčení.

Zkušební tělesa jsou čtvercového tvaru s kolmo řezanými hranami o stranách 200 ±1 mm a musí být vyříznuty tak, aby neobsahovala žádnou hranu původního výrobku. Kondicionování probíhá za zkušebních podmínek, tzn. při teplotě 23 ±5 °C po dobu minimálně 6 hodin.

Zkušební těleso se ponoří do vody spodní částí 10 ± 2 mm pod hladinu vody a dostatečně se zatíží tak, aby zůstalo ponořeno po celou dobu zkoušky. Hladina vody musí být v průběhu zkoušky stálá.

V případě metody A (odkapání) se zkušební těleso po 24 hodinách/28 dnech vyjme, umístí se do svislé polohy na síť a nechá se odkapat po dobu 10 ± 5 min. Poté se zkušební těleso opět zváží a stanoví se hmotnost m_{24}/m_{28} .

V případě metody B (odečtení počátečního zvlhčení) se po 10 vteřinách, kdy je vzorek v kontaktu s vodou, tento vzorek vyjme a ve vodorovné poloze se umístí během 5 vteřin na plastovou misku známé hmotnosti. Zjistí se hmotnost zkušebního tělesa m_1 včetně počátečního zvlhčení. Poté se vrátí do nádržky a postup se po 24 hodinách/28 dnech opakuje, čímž se stanoví hmotnost m_{24}/m_{28} .

Pro metody stanovení krátkodobé, respektive dlouhodobé nasákavosti částečným ponořením se podle normy pro tepelné izolace výsledky vyjadřují v kg/m^2 , přičemž výsledky získané různými zkušebními metodami nejsou srovnatelné. Případně se může využít jednobodová metoda pro zpracování dat A_{cap} , která je popsána v kapitole 3.4.4. [10] [11]

3.2.2 Úplné ponoření

Pro úplné ponoření se stanovuje pouze dlouhodobá nasákavost, která není přímo vztažena k podmínkám na staveništi, ale podle normy byla pro některé výrobky při určitých použitíh uznána jako vhodná zkušební podmínka.

Stanovuje se takto maximální vlhkost v objemových procentech, tzn. maximální množství vlhkosti, které v materiálu může být obsaženo procentuálně k jeho objemu po jisté době ponoření vzorku do vody – v případě normy ČSN EN 12087 pro tepelné izolace je vzorek ponořen po dobu 28 dní.

Zkušební tělesa, zkušební podmínky i postupy jsou stejné jako v případě dlouhodobé nasákavosti částečným ponořením s tím rozdílem, že se zkušební těleso ponoří do vody 50 ± 2 mm pod hladinu vody. Pro dlouhodobou nasákavost úplným ponořením existuje ještě třetí metoda, kdy je vzorek umístěn v kleci o známé hmotnosti. Tato klec je zdola zavěšena na vahách a ponořena do vody tak, aby byl horní povrch vzorku 50 ± 2 mm pod hladinu vody.

Pro metody úplného ponoření je třeba znát kromě spodní plochy navíc výšku pro výpočet objemu tělesa a následný výpočet nasákavosti. Naměřená data se kromě objemové nasákavosti mohou vyjádřit hmotnostní nasákavostí nebo také pomocí jednobodové metody (kapitola 3.4.4).

3.3 Ostatní metody měření

3.3.1 Metody měření v terénu a starší metody měření

Zkoušení nasákavosti a dalších vlastností je důležité také u historických staveb, především u objektů, které jsou předmětem památkové ochrany.

Karstenova trubice

V posledních desetiletích byla k tomuto účelu hojně využívána tzv. Karstenova trubice, která se skládá z výtokové kruhové části s průměrem 25 mm. Je připevněna na povrch zkoumaného materiálu pomocí fixačního tmelu a zajišťuje kontakt kapaliny s měřeným povrchem. Na výtokovou část navazuje otevřená skleněná trubice s kalibrovanou stupnicí pro měření objemu kapaliny vsakované do materiálu. Odečet absorbovaného množství se provádí v periodických časových intervalech.

Měření probíhá při nízkém tlaku tlačícím kapalinu do materiálu, může být realizováno jak v laboratoři, tak v terénu a na vodorovném i svislém povrchu.

Metoda funguje dobře, když je kontakt mezi Karstenovou trubicí a povrchem materiálu bezchybný. V případě nerovného povrchu nebo nesoudržného materiálu je však měření problematické. Geometrické okrajové podmínky jsou složité a v mnoha případech vedou k nepřesným nebo nepoužitelným výsledkům. Je to způsobeno rostoucím penetračním objemem kolem kontaktního kruhového výtoku na povrchu. Navíc se trubice špatně upevňuje k svislým povrchům, tmel znečišťuje historické povrchy a většinou je zapotřebí dvou operátorů k obsluhování. [12]



Obr. 4: Karstenova trubice při měření in-situ [12]

Byl vyvinut speciální software pro odpovídající výpočty za předpokladu ideálních geometrických podmínek a homogenního materiálu. Problémy nastávají pro nehomogenní porézní systémy s trhlinami, poškozenými oblastmi, vodou nasycenými oblastmi nebo jinými heterogenitami.

Mirowského trubice

Tato modifikovaná trubice je uzavřená zahnutá trubice s objemem 10 ml, která se ukázala vhodnější pro měření in-situ (v terénu). Výtok této trubice je opatřen porézní houbou, která zprostředkuje rovnoměrný transport vody do zkoušeného materiálu. Plocha penetrace je menší než u klasické Karstenovy trubice. Proces záznamu dat je obdobný jako u Karstenovy trubice.

Tato metoda se dále inovovala. Například byla použita skleněná kapilára opatřená stupnicí a s výtokem o průměru 9 mm, který byl vyplněn cigaretovým papírovým filtrem sloužícím jako kontaktní materiál pro zamezení znečištění povrchů fresek tmely použitých k upevnění skleněných trubic. Nebo spojení výtokové hubice s kapilárou ohebnou hadičkou, což umožnilo měření na skloněných plochách kleneb, případně na stropěch.

Houbičková „sponge“ metoda

Tato metoda má mnoho modifikací podle typu použité houbičky. Základní myšlenkou je vážení vlhké houbičky před a po měření, aby se zjistilo množství absorbované vody za určitý čas, po který je houbička v kontaktu s materiálem. U této metody je potřeba perfektně uzavíratelné krabičky pro přepravu houbičky z terénu do laboratoře nebo přítomnost dostatečně citlivých vah při měření in-situ.

Mikrotrubice ÚTAM AV ČR

V ÚTAM AV ČR, v. v. i., byl vyvinut další přístroj za účelem zpřesnit, zrychlit a ulehčit měření nasákavosti v terénu.

Nakonec vznikla terénní i laboratorní varianta přístroje.

Pro terénní účely je přístroj konstrukčním provedením schopen měřit in-situ i těžko přístupná místa a tvarově složité plochy. Umožňuje kontinuální měření s digitálním záznamem dat a jejich vyšší přesností.

Měření nasákavosti začíná v momentě, kdy se cigaretový filtr dostane do kontaktu se zkoumaným materiálem – poprvé se zmáčkne spoušť. Poté pokaždé, když hladina v mikrotrubici mine dílek stupnice, je spoušť stisknuta znovu. Přístroj zaznamenává pouze čas, tzn. rozdíl dvou měření udává, jak rychle byl absorbován objem 0,01 ml. Malý průměr kontaktní

plochy umožňuje měřit rozmanitější druhy povrchů než Karstenova trubice. Měření není omezeno výskytem trhlin, kterým se lze jednoduše vyhnout, a v materiálu lze přímo testovat i přítomné heterogenity.



Obr. 5: Měření mikrotrubicí in-situ na ideálním povrchu [12]

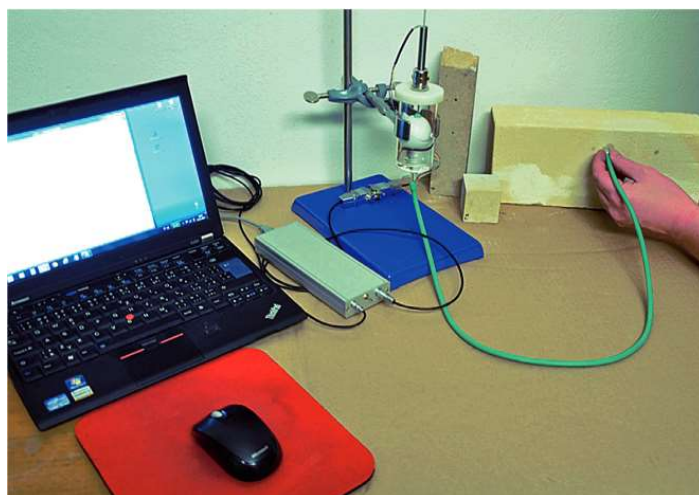
3.3.2 Nové metody měření

Ve výzkumných laboratořích se aktuálně vyvíjí vysoce specializované měřicí metody, pomocí nichž se kvantitativně určí kapilární přenos a měření příslušných součinitelů. Tyto metody využívají například záření gama a neutronovou absorpci nebo nukleární magnetickou rezonanci (NMR) společně s komplexními matematickými postupy k analýze výsledků. Bude ale trvat ještě řadu let, než bude možné podobné metody normalizovat. [2]

Mikrotrubice ÚTAM AV ČR – laboratorní varianta přístroje

Zařízení se skládá z kalibrované nádržky na kapalinu, která obsahuje plovák určující výšku hladiny. K nádržce je napojena pružná hadička, na jejímž konci je výtokový kovový kroužek s průměrem 8 mm. Do něj se vkládá jako kontaktní médium pro rovnoměrný přechod kapaliny do materiálu papírový cigaretový filtr.

Měření objemu absorbované vody je založeno na snímání pohybu plováku v nádržce. Údaje jsou přenášeny do počítače v reálném čase. [12]



Obr. 6: Laboratorní varianta měření mikrotrubicí [12]

Automatizovaná metoda měření hmotnostních přírůstků

Automatizované měření může být analogií ruční metody měření hmotnostních přírůstků vody v závislosti na čase.

Připravené vzorky podle požadavků ČSN EN ISO 14158 (nebo jiných požadavků) jsou zavěšeny na digitální váze, která zaznamenává hmotnosti vzorků automaticky pomocí programu v nastavených časových intervalech a údaje přenáší do počítače.

Zpracování naměřených dat je totožné s ruční metodou, viz následující kapitola 3.4.



Obr. 7: Automatizované měření v laboratoři UPV

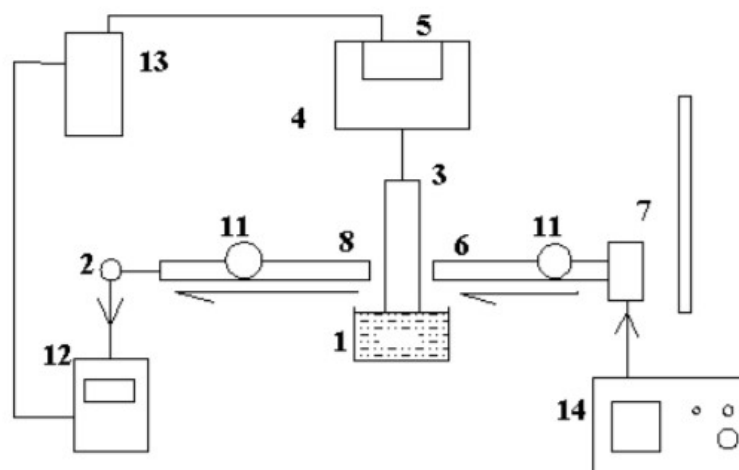
Radiografické metody

Aktuálně již lze studovat pochody uvnitř mikrostruktury materiálu, např. závislosti mezi rychlostí průniku, hloubkou a objemem nasáklého materiálu nebo tvar vlny, jíž se kapalina materiálem šíří. Pro tyto účely je nezbytný pohled do vnitřní struktury pevných látek pomocí radiografických metod.

V Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR využili zobrazování rentgenovým zářením ke sledování průniku kapaliny porézním vápencem. Vzorky materiálu byly podrobeny mikrotomografickému měření a ze získaných dat je možné vypracovat mikrostrukturní model s vysokým rozlišením, vhodný pro numerickou simulaci průchodu kapaliny materiálem s použitím metody konečných prvků.

Výsledky numerických simulací byly porovnány jak s výsledky radiografického zobrazování procesu penetrace v reálném čase, tak s výsledky přímého měření nasákavosti mikrotrubicí a ukázaly dobrou shodu. [12]

Na ÚPST FAST VUT v Brně byla v rámci disertační práce experimentálně sestavena měřicí aparatura s využitím elektromagnetického mikrovlnného záření, která umožňuje nedestruktivní detekci transportu vlhkosti v inertních pórovitých hmotách. [9]



Obr. 8: Schéma uspořádání experimentální měřicí aparatury [9]

Konstrukční schéma měřicí aparatury na obr. 8 sestává z nádržky na kapalinu (1) a polohovacího mechanismu. Nad nádržkou je zkoušený vzorek (3) upevněný ve třmenu (4), který je zavěšen na digitální váze (5). V prostoru nad nádržkou je umístěn vysílací vlnovod (6) mikrovlnného záření, napojený na zdroj záření (7), připojený ke zdroji napětí (14). Z druhé strany od nádržky je proti vysílacímu vlnovodu umístěn přijímací vlnovod (8). Na obou vlnovodech jsou zabudovány clony (11), s jejichž pomocí lze upravovat intenzitu záření. Přijímač mikrovln je napojený na multimetr (12), ze kterého lze odečítat hodnoty změny intenzity záření. Multimetr je připojený k počítači (13), kde lze pomocí odpovídajícího programu sledovat výsledky. [9]

3.4 Metody zpracování dat A_{cap}

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.3 o fyzikálních principech transportu kapalné vody, absorpční koeficient A_{cap} je obecně definován jako tangenta nárůstu kumulovaného obsahu vody poděleného odmocninou z času během 1. fáze.

Proces kapilární absorpce materiálů lze znázornit křivkou nasákavosti a lze ideálně rozdělit na dvě fáze – 1. rychlou fázi a 2. pomalou fázi.

V první etapě dominuje kapilární síla, přičemž voda do té doby nedosáhla vrchního povrchu vzorku. Po dosažení vrchního povrchu vzorku nastává pomalejší 2. fáze, kdy jsou rozptýleny zachycené molekuly vzduchu v pórech. Mezi těmito fázemi dochází k přechodu, tzv. „cross point“. Dle konkrétního materiálu může být tento přechod velmi výrazný, nebo téměř zanedbatelný.

Většinou jsou obě tyto etapy lineárním vztahem mezi kumulativním přírůstkem a druhou odmocninou z času, ale není tomu tak u všech materiálů, což je přisuzováno především gravitaci a pórovému systému materiálů. [7] [13] Ve většině případů metod zpracování dat A_{cap} není vyřešena otázka výpočtu právě u těchto materiálů, které mají v 1. fázi průběh kapilární absorpce nelineární.

Následuje popis používaných postupů zpracování dat A_{cap} a jsou vypsány výhody, nevýhody a použitelnost jednotlivých metod.

3.4.1 Lineární regrese (jedno-tečná metoda)

Metoda lineární regrese je využívána nejčastěji a také je doporučena normou ISO 15148. [2]

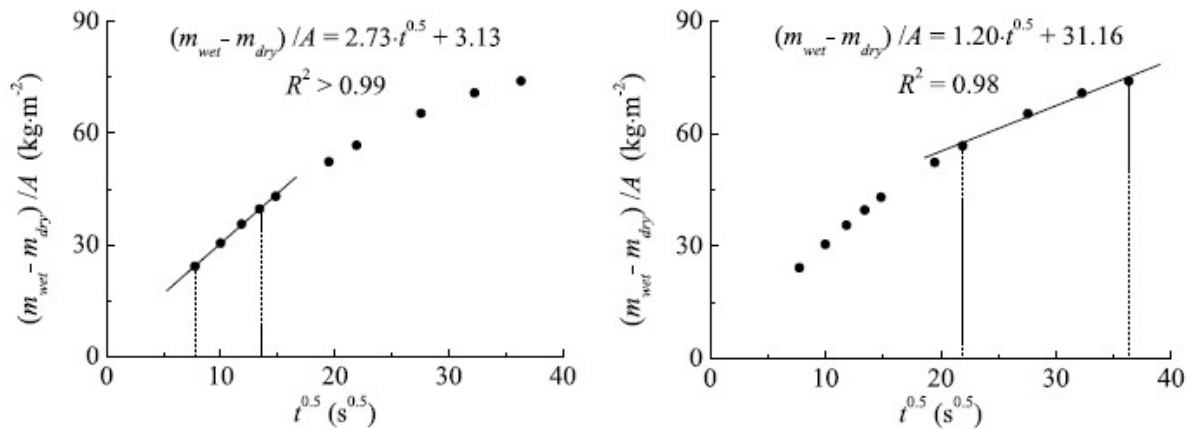
Sklon tangenty je získán pomocí naměřených dat v 1. fázi a absorpční koeficient je vyjádřen podle:

$$\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot t^{\frac{1}{2}} + k_1, \quad (3.4-1)$$

kde k_1 je konstantní aplikační koeficient, který vyjadřuje posunutí na ose y.

V případě, že je první fáze kapilárního absorpčního procesu lineární, je tato metoda vhodná díky jednoduchosti a pevnému fyzikálnímu základu.

Pokud je ale počáteční fáze zkrácena například velikostí pórů, čímž je odchýlena od lineárního chování, výsledek se stává velmi nespolehlivý kvůli citlivosti na výběr dat, což je znázorněno následujícími grafy. Je zřejmé, že pro některé materiály je určení A_{cap} tímto způsobem velmi variabilní, a proto není tato metoda vhodná ve všech případech.



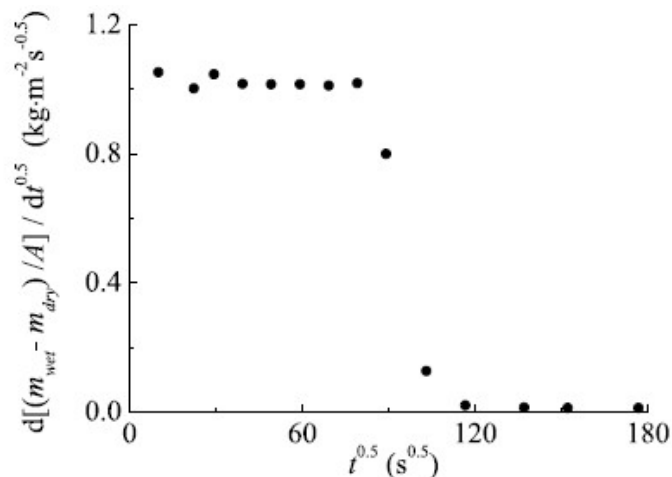
Obr. 9: Jedno-tečná metoda pro výpočet A_{cap} – variabilita výběru dat u materiálů s nepravidelnou 1. fází [7]

3.4.2 Modifikovaná lineární regrese

Tato metoda je úpravou jedno-tečné metody. Namísto kumulativního přírůstku vztaženého na plochu je vykreslena derivace kumulativního přírůstku vztaženého na plochu dělena derivací odmocniny z času:

$$\partial \frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} / \partial t^{\frac{1}{2}} \quad (3.4-2)$$

Tento způsob vykreslení zobrazuje jednotlivé změny A_{cap} , které nejsou viditelné v předchozí metodě. Nicméně matematický výpočet A_{cap} není u modifikované metody jasný a využívá se spíše výpočet původní.



Obr. 10: Modifikovaná jedno-tečná metoda pro výpočet A_{cap} [7]

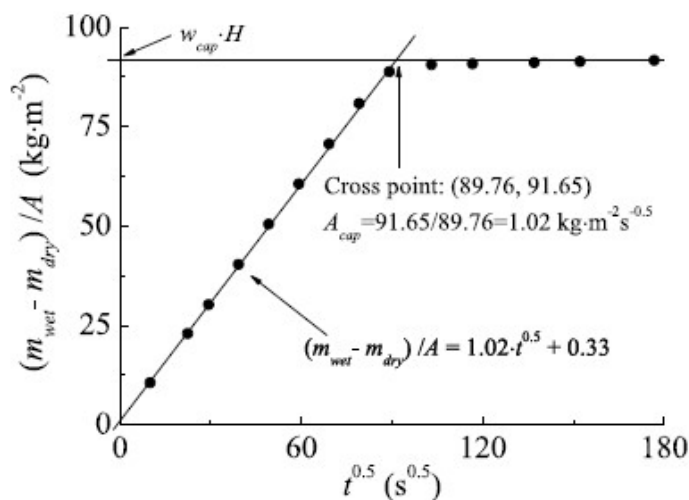
3.4.3 Dvou-tečná metoda

Podle této metody by mělo měření probíhat do chvíle, kdy je kumulativní hmotnostní přírůstek menší než 1 % celkové váhy během 24 hodin. Pak je vykreslena tečna $y=y_{cross}$, která představuje konečný kumulativní přírůstek. Druhá tečna se vykreslí, stejně jako u jedno-tečné metody, pomocí naměřených dat v 1. fázi absorpčního testu. Tyto dvě tečny se protnou v jednom bodě tzv. „cross point“ se souřadnicemi $[x_{cross}; y_{cross}]$ a A_{cap} je vyjádřen jako:

$$A_{cap} = \frac{y_{cross}}{x_{cross}} \quad [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}]. \quad (3.4-3)$$

Problém této metody je, že obecně uznávaná definice říká, že absorpční koeficient zobrazuje rychlost absorpce vody hnané kapilární silou během 1. fáze, kdežto tato metoda počítá s konečným kumulativním přírůstkem po dosažení kapilárního obsahu vlhkosti. Proto se výsledky mohou značně lišit od jedno-tečné metody.

Navíc tuto metodu nelze použít pro výpočet absorpčního koeficientu v případě, že je měření ukončeno před dosažením 2. fáze. A protože vykreslení druhé tečny vychází z jedno-tečné metody, neřeší problém u materiálů s nepravidelným průběhem v 1. fázi.



Obr. 11: Dvou-tečná metoda pro výpočet A_{cap} [7]

3.4.4 Jednobodová metoda

Jak již bylo popsáno, v této metodě se měří množství vlhkosti pouze v předepsaném čase $t = t_{end}$ během celého procesu. A_{cap} se poté vypočte podle rovnice

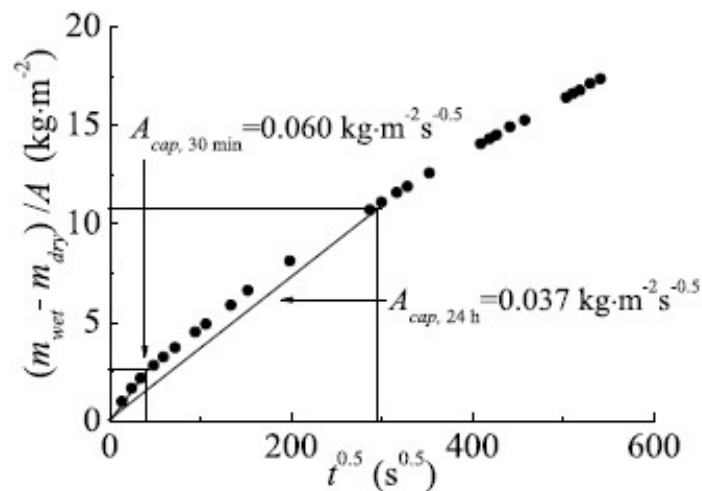
$$A_{cap} = \frac{(m_{wet} - m_{dry})/A}{t^{1/2}} \Big|_{t = t_{end}} \quad [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}]. \quad (3.4-4)$$

Předepsaný čas měření může být různý od 1 minuty po 24 hodin, ale základní princip je stejný.

U této metody může dojít k významným nesrovnalostem a je obtížné správně stanovit t_{end} , protože závisí na mnoha faktorech jako například – materiál, výška vzorku, laboratorní teplota apod.

Pro materiály s velkou nasákavostí musí mít vzorky dostatečnou výšku, aby měření konečného obsahu vlhkosti proběhlo v první fázi absorpce, naopak u materiálů s malou nasákavostí, musí experiment trvat dostatečně dlouho pro spolehlivé určení hodnoty A_{cap} .

Jak je vidět na následujícím grafu, v případě nepravidelného průběhu během 1. fáze se výsledky A_{cap} ještě mnohem více liší v závislosti na zvolení konečného času, a proto je tato metoda nevhodná.



Obr. 12: Jednobodová metoda pro výpočet A_{cap} s různým t_{end} u materiálů s nepravidelnou 1. fází [7]

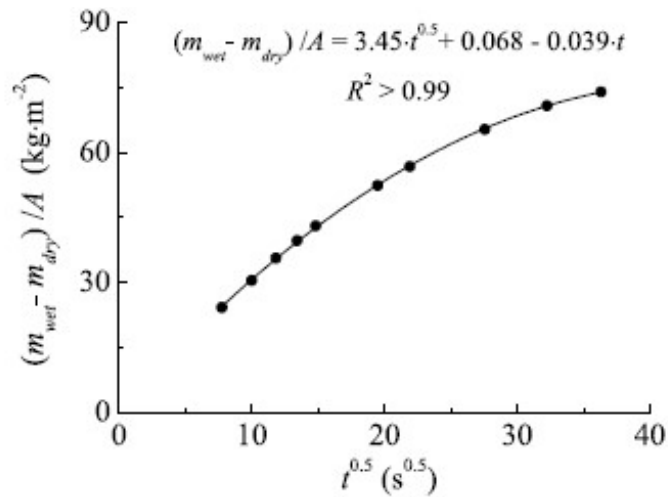
3.4.5 Hallova metoda

Pro případy, kdy má velký vliv gravitace, navrhl Hall úpravu vzorce jedno-tečné metody.

$$\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot t^{\frac{1}{2}} + k_1 - k_2 \cdot t. \quad (3.5-5)$$

kde $k_2 \cdot t$ představuje kumulativní působení gravitace.

Díky tomu, že je tato metoda odvozena od základního vzorce, hodí se pro lineární i nelineární průběh absorpčního procesu. V případě, že gravitace nehraje velkou roli, blíží se parametr k_2 k nule a vzorce se shodují.



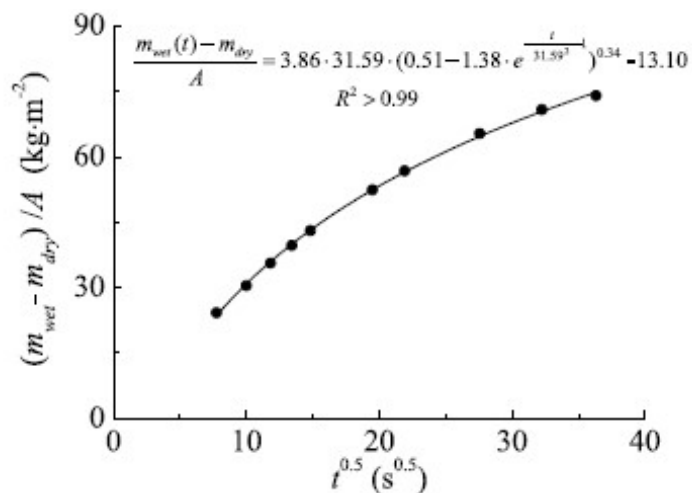
Obr. 13: Hallova metoda pro výpočet A_{cap} [7]

3.4.6 F – J metoda

Vedle Hallovy metody navrhl Feng a Janssen v roce 2018 nový model pro určení A_{cap} pro materiály s nepravidelnou 1. etapou absorpčního procesu, v této práci tzv. F – J metoda.

$$\frac{m_{wet}(t) - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot k_3 \cdot \left(0,5103 - 1,3849 \cdot e^{-\frac{t}{k_3^2} - 1}\right)^{0,3403} + k_4, \quad (3.4-6)$$

kde k_3 a k_4 jsou proměnné aplikační koeficienty.

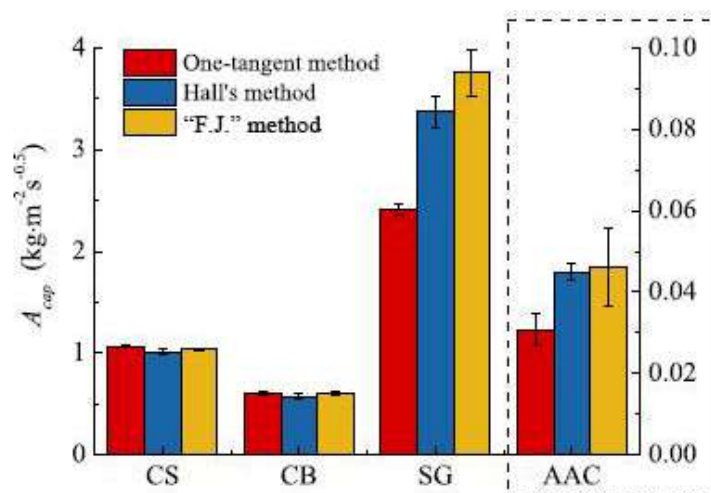


Obr. 14: „F – J.“ metoda pro výpočet A_{cap} [7]

Výsledky Hallovy metody a nové F – J metody jsou relativně shodné i u materiálů jako pórobeton a slinuté sklo (viz obr. 15), s relativním rozdílem přibližně 10 %, což je na stejné úrovni jako nehomogenita materiálu a chyby opakovatelnosti.

Vzhledem k tomu, že jsou obě rovnice odvozeny z různých procesů, lze předpokládat, že výsledky jsou u obou metod dostatečně přesné. To dokazuje také koeficient spolehlivosti R^2 , který je pro oba způsoby vyšší než 0,99. Navíc byly výsledky těchto metod také porovnány na homogenních materiálech s výsledky jedno-tečné metody a výsledky jsou taktéž téměř identické viz obr. 15.

V grafu je zobrazeno porovnání metod na vzorcích kalcia-silikátu (CS), cihly (CB), slinutého skla (SG) a pórobetonu (AAC).



Obr. 15: Srovnání výsledků A_{cap} získaných různými metodami [7]

V praxi není předem jasné, jestli má materiál ideální nebo nepravidelný absorpční vzorec, proto je nejjistější použít Hallovu nebo novou F – J metodu, které fungují pro všechny případy. [7]

3.5 Metoda zpracování w_{cap}

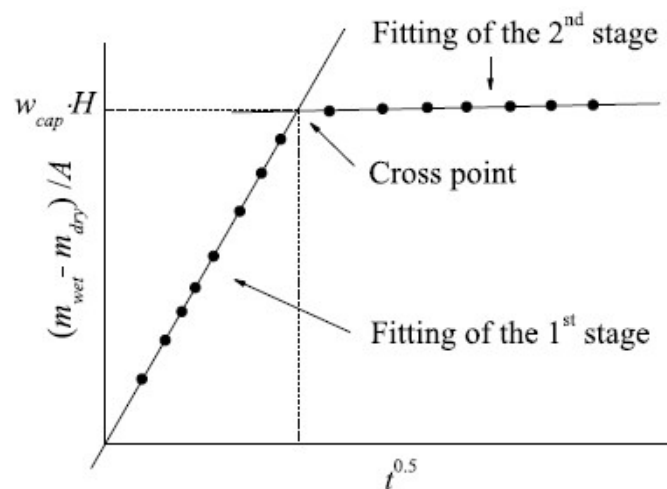
Norma ISO 15148 předepisuje, že pokud se na horním povrchu vzorku objeví voda, měření musí být ukončeno, tzn. nasycený obsah kapilární hmotnosti není v normě vůbec uvažován. [2]

Ve výzkumných člancích je ale w_{cap} často používán. Definován je jako obsah vlhkosti při přechodu z 1. etapy na 2. etapu absorpčního procesu. V případě lineární 2. fáze, lze dopočítat bod průniku („cross“ point) a w_{cap} lze odvodit vydělením kumulativního přírůstku tohoto bodu (souřadnice y) výškou vzorku H (m).

$$w_{cap} = \frac{(m_{wet} - m_{dry})}{A} \Big|_{cross} \cdot \frac{1}{H} \quad [\text{kg/m}^3], \quad (3.5-1)$$

V případě Hallova vzorce, w_{cap} často nelze určit, protože je vzorec navržen pouze pro 1. fázi a popisuje kvadratickou funkci s nezávislou proměnnou $t^{1/2}$. Po dosažení vrcholu začíná tato funkce klesat, takže v některých případech nelze nalézt průsečík neboli cross point, mezi kvadratickou funkcí 1. fáze a lineární funkcí 2. fáze.

Podle vztahu F – J metody je nalezení průsečíku mezi fázemi možné vždy, a proto je stanovení w_{cap} možné pro všechny případy. [7]



Obr. 16: Stanovení w_{cap} [7]

B. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4 Cíl práce

Experimentální část práce je zaměřena na metody měření a vyhodnocování dat při stanovování nasákavosti vybraných materiálů. Měření probíhá ve dvou laboratořích za podmínek reprodukovatelnosti. Cíle práce jsou následující:

- Porovnání naměřených výsledků kalcia-silikátu s publikovanou literaturou pro kvantitativní analýzu výsledků a zjištění mezilaboratorních chyb.
- Zjištění míry dopadu některých ovlivňujících faktorů na měření.
- Návrh vhodného postupu měření vláknitých materiálů pro stanovení dynamické nasákavosti v čase
- Zjištění důležitosti přesnosti měření pro účely počítačových modelů a praktické využití výsledků.

5 Použité materiály, metody měření a zpracování dat

5.1 Materiály

V současné době je stále aktuálnější otázka snižování spotřeby energií a úspora energetických surovinových zdrojů. O energetické účinnosti budov a o spotřebě provozní energie domu na vytápění rozhoduje především tepelná izolace. Z tohoto důvodu byly pro měření v této práci vybrány tři tepelněizolační materiály.

Zároveň by měla být z pohledu trvale udržitelného rozvoje snaha prosazovat při výrobě obnovitelné zdroje surovin, snížit energickou náročnost při jejich získávání a zpracování. Přírodním materiálům je ale ve stavebnictví věnováno stále velmi málo prostoru.

Jak bylo zmíněno v úvodu, v laboratořích bývají tyto materiály povětšinou upozaděny a nejsou dostupné spolehlivé databáze jejich materiálových vlastností. Výrobci udávají často sporné nebo neúplné informace a ani v normě nejsou dostatečně specifikovány postupy měření vlastností těchto materiálů. Také kvůli tomu je toto měření stále velmi problematické a výsledky jsou většinou zatíženy velkou chybou. Proto je v této práci měřena nasákavost na dvou

přírodních vláknitých materiálech a je snaha navrhnout vhodnou metodu měření, která je popsána v kapitole 4.4.2.

Třetí tepelnou izolací je zástupce syntetických materiálů – kalcium-silikát, který je použit pro zjištění dopadu některých ovlivňujících faktorů a pro srovnání výsledků mezi laboratořemi.

V tabulce 2 jsou shrnuty některé vlastnosti z technických listů od výrobců konkrétních použitých výrobků v této práci. V případě kalcia silikátu je hodnota koeficientu difúzního odporu μ převzat z článku Chi Fenga a Hanse Janssen: Hygric properties of porous building materials (III) [7] – v tabulce označeno hvězdičkou.

Kalcium-silikátové neboli také vápeno-silikátové desky jsou pro měření experimentální části použity konkrétně desky SKAMOTEC 225 s tloušťkou 40 mm a jsou v tabulce a dále v textu značeny CS. Konopné desky jsou použity desky TERMO-KONOPI PREMIUM s tloušťkou 60 mm a jsou značeny H. Dřevovláknem je značeno WF a jsou použity desky STEICOFlex 038 s tloušťkou také 60 mm.

Značení materiálových charakteristik viz seznam použitých symbolů.

| Materiálová charakteristika | CS | H | WF |
|-----------------------------|-------|-------|--------|
| λ [W/m·K] | 0,061 | 0,040 | 0,038 |
| ρ [kg/m ³] | 245 | 30-42 | cca 50 |
| μ [-] | 2,0* | 1-2 | 1-2 |
| c [J/kg·K] | 840 | 2300 | 2100 |

Tab. 2: Některé materiálové charakteristiky z technických listů výrobců [14] [15] [16]

Následuje stručná charakteristika těchto materiálů, jejich využití a zdůvodnění výběru pro měření v experimentální části této práce.

5.1.1 Kalcium-silikát

CS je známý pro svou homogenitu, vykazuje minimální materiálové chyby, chyby opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. [1] Navíc je velmi kapilárně aktivní a průběh 1. fáze kapilární nasákavosti má lineární, proto se ideálně hodí pro účely srovnání výsledků mezi laboratořemi a zjišťování míry dopadu některých ovlivňujících faktorů pro účely návrhu vhodného experimentálního postupu pro vláknité materiály.

Desky z CS jsou šetrné k životnímu prostředí, jsou nehořlavé s vysokým tepelným odporem, poměrně vysokou mechanickou pevností a nízkou tepelnou vodivostí, a proto jsou vhodné pro

obestavení krbů. Pro svůj vysoký součinitel vlhkostní vodivosti nejsou vhodné pro zateplování exteriérové strany, ale využívají se pro vnitřní zateplování. [14] [17] Jedná se o složitou problematiku a je nutné důsledně posoudit tepelně vlhkostní chování a klást důraz na řešení detailů. Ale mnohdy je to nejvhodnější řešení především pro historické a architektonicky cenné budovy, u kterých z důvodů např. památkové péče nelze provést zateplení z vnější strany.



Obr. 17: Vzorky kalcia-silikátu různých velikostí

5.1.2 Dřevovláknno

Obecně dřevovláknno je jeden z přírodních materiálů, který se v současné době využívá (oproti jiným přírodním materiálům) v poměrně velké míře. Na trhu je již celá řada výrobců. Každý výrobce využívá odlišnou technologii výroby, čímž dosahují různých vlastností výrobků, které jsou díky tomu využitelné pro různé účely, např. pro zateplení stěn, střech i stropů a podlah. Můžou se využít pro dodatečné zateplení konstrukcí, pro akustické izolace podlah a některé typy desek jsou vhodné i pro interiérové zateplení. [18] Nejčastěji se tyto izolace používají stejně jako konopné desky ve dřevostavbách, protože mají nízký difúzní odpor, díky čemuž se hodí pro difúzně otevřené konstrukce. Tento materiál má dobré také tepelně technické vlastnosti, akumulaci vlastnosti a sorpční schopnosti, díky čemuž se reguluje klima v interiéru, je ekologický, recyklovatelný a příznivý k životnímu prostředí. [19] [20] [21]

Díky těmto výhodám a možnosti širokého využití byly dřevovláknité desky vybrány pro měření v této práci a byly na nich kromě jiného zjišťovány dopady vlivu vystavení vysoké

teplotě. Průběh křivky nasákavosti byl ovlivněn složením konkrétních použitých desek. Ty jsou složeny z dřevních vláken, polyolefinových vláken a fosforečnanu amonného.



Obr. 18: Vzorky dřevovláknů různých velikostí

5.1.3 Konopí

Konopí seté, tzv. technické konopí, je klasická obnovitelná dorůstající rostlina nesoucí minimální ekologickou stopu. Téměř všechny části rostliny mají velice širokou využitelnost v nejrůznějších oblastech. Při zpracování rostliny na vlákna vzniká odpadní materiál, tzv. pazdeří, které se dále lisuje a lze využít mimo jiné také jako surovina pro výrobu izolačních desek. Další výhodou této plodiny je její velmi rychlá obnovitelnost, během 120 dnů může dosahovat výšky až 4,5 m a z jednoho hektaru osetého konopím lze sklídit až 12 tun suché suroviny, které stačí na výrobu 8 tun stavebního materiálu.

Konopí může být svými vlastnostmi dobrou alternativou minerální vlny. Má srovnatelné akustické a tepelné vlastnosti – výpočtová hodnota součinitele tepelné vodivosti $\lambda = 0,040-0,060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a měrná tepelná kapacita $c = 1600-1700 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ je ve srovnání s minerálními izolacemi příznivější – konopné izolace pojmu téměř dvojnásobné množství tepla. Materiál je difúzně velmi propustný, faktor difúzního odporu $\mu = 1-2$. Kromě toho má schopnost redistribuovat vlhkost a objemová vlhkost může narůst až na 20 % bez snížení tepelněizolačních schopností – pro srovnání u minerálních izolací k tomu dochází již při 2 % objemové vlhkosti. [22]

Produkty z konopí se ve formě rohoží, plstí, desek, panelů nebo drti mohou využít jako tepelné i zvukové izolace vnějších i vnitřních stavebních konstrukcí, na izolaci střech, stěn a podlah u novostaveb i rekonstrukcí. Ideální požití je ve dřevostavbách, kde se uplatňuje difúzně otevřená skladba konstrukcí. [19] [20] [21] [23]

Pro svůj velký a zatím ne dostatečně využitý potenciál bylo konopí zvoleno pro měření v této práci a byla na něm testována navrhovaná metoda měření nasákavosti a dopad vlivu vystavení vysoké teplotě. Konkrétní použitý materiál je složen z 83-87 % konopných vláken, 10-12 % dvousložkových vláken a 3-5 % hydrogenuhličitanu sodného jako protipožární ochrany.



Obr. 19: Vzorok konopí různých velikostí

5.2 Posuzované ovlivňující faktory

Přestože jsou dostupné mezinárodní normy předepisující postup absorpčního testu, je stále mnoho faktorů nejasných, protože je normy nezohledňují. To umožňuje difference v měření a způsobuje nejednotu mezilaboratorních výsledků.

Aspektů, které ovlivňují měření, je velké množství a vedou se o jejich vlivu na absorpční test diskuze. Obecně mohou být tyto faktory rozděleny do tří kategorií:

- materiálové faktory
- faktory prostředí
- faktory postupu.

Jeden z nejasných materiálových faktorů je například velikost vzorků. Norma ISO 15148 požaduje minimální plochu v kontaktu s vodou 50 cm^2 , ale výzkumníci často používají vzorky s plochou menší.

Odchytky mohou být způsobené také různým prostředím. Jednoznačný není vliv teploty na A_{cap} a liší se také například způsob izolování bočních stran vzorků a názory ohledně vhodnosti některých materiálů pro tyto účely.

Vedle těchto faktorů je ještě více klíčová metoda měření a zpracování naměřených dat.

V této práci byly některé faktory experimentálně ověřeny a byly porovnávány dopady na výsledky měření.

5.2.1 Velikost vzorků

Norma ISO 15148 vyžaduje spodní plochu $A \geq 50 \text{ cm}^2$. Pokud je plocha menší než 100 cm^2 , je požadavek nejméně 6 vzorků s celkovou plochou větší než 300 cm^2 . [2] Výška vzorku není v této normě stanovena, přestože je důležitá z hlediska doby trvání testu.

Normy ČSN EN 1609 a ČSN EN 12087:2013 pro stanovení nasákavosti tepelněizolačních výrobků předepisují čtvercový průřez vzorků o stranách 200 mm. Výška vzorků se musí shodovat s původní výškou výrobků. [11] [10]

Limit velikosti vzorku je diskutabilní, protože s menšími vzorky lze lépe manipulovat, díky čemuž může být měření přesnější. Kromě toho je řezání některých materiálů na určitou velikost problematické.

Volba výšky vzorků závisí kromě dobré manipulovatelnosti především na nasákavosti konkrétního materiálu, což ovlivňuje délku trvání experimentu. Měření by mělo trvat desítky minut až několik dní.

Podle C. Fenga a H. Janssenů různě velké vzorky nevykazují významné rozdíly v měření A_{cap} a w_{cap} a absorpční test i na malých vzorcích je stále vysoce opakovatelný, což podle nich ukazuje na možnost zmenšení plochy A bez snížení spolehlivosti testu, pokud materiál není extrémně nehomogenní nebo neobsahuje velmi hrubé částice o velikosti v řádu centimetrů.

V této práci bylo provedeno měření vlivu velikosti vzorků na vzorcích kalcia-silikátu. Vzorky měly čtvercový průřez o délkách stran 11, 8 a 5 cm. Podle tohoto měření je dokázán nepříznivý dopad na spolehlivost experimentu zmenšením vzorků a současným působením dalších faktorů např. izolování vzorků a nehomogenita materiálu. Je to způsobeno geometrickým poměrem P/A (obvod ku ploše vzorku) viz. kapitola 6.1.2.

5.2.2 Způsob izolování vzorků

Pro zajištění 1D transportu vlhkosti, musí být boční strany vzorku zaizolovány. Norma ISO 15148 pro tyto účely požaduje vodotěsný a parotěsný materiál, který nesmí chemicky reagovat, nebo podstatně pouštět páry do pórů výrobku. Často ale není možné předem odhadnout vzájemné působení materiálů bez provedení přípravného experimentu před samotným měřením nasákavosti. Výběr vhodného izolantu pro konkrétní měřené materiály je pro spolehlivost zkoušky a pohodlnou manipulaci se vzorky velmi důležitý.

Horní strana by měla být uzavřena nepropustným materiálem tak, aby snížila odpar vlhkosti z horního povrchu, ale zároveň neovlivňovala průběh kapilární absorpce, tzn. bez kontaktu se

vzorkem a s malými otvory umožňujícími odvod vytlačovaných molekul vzduchu z pórů vzorku. Toto norma nezmiňuje.

V případě vláknitých nebo volně sypaných materiálů o nízké objemové hmotnosti norma umožňuje tyto materiály vložit do trubky s připevněným ochranným pletivem na čelní straně. Materiál této trubky vůbec není specifikován, přestože může svou vlastní nasákavostí výrazně změnit průběh a výsledky zkoušky.

Obecně existují dva používané způsoby utěsnění bočních stran tuhých vzorků – pokrytí těchto stran páskou/fólií, případně natření barvou nebo pryskyřicí.

Některými výzkumníky byla zpochybnována vhodnost samolepicích fólií, ovšem bez experimentálního podložení. Podle posledních zkoušek v roce 2018, provedených C. Fengem a H. Janssenem, je poměrná shoda u většiny materiálů izolovaných jak nelepivými, tak samolepicími fóliemi. Pouze u slinutého skla byly shledány větší chyby měření, ale tímto jedním měřením nelze podle nich prohlásit samolepicí fólie za nevhodné. Naopak tvrdí, že díky „experimentálnímu pohodlí“, bezpečnosti a snazší recyklovatelnosti je izolování nelepivými i samolepicími pásky vhodnější než izolování barvou nebo pryskyřicí.

U epoxidové pryskyřice bylo navíc experimentálně zjištěno, že proniká do vzorku předtím, než ztuhne – podle výpočtů až do 1,5 mm vzorku.

To bylo zjištěno i v případě transparentního tmelu a lepidla Pattex použitého v této práci. Kromě tohoto lepidla byla pro srovnání použita bitumenová páska, která ale nebyla u vzorků z kalcia-silikátu dostatečně přilnavá kvůli prašivosti izolovaného materiálu, viz kapitola 6.1.2.

Izolování bočních stran přírodních vláknitých nebo volně sypaných a foukaných materiálů je velmi problematické a ovlivňuje výsledky měření absorpčního testu ještě více, než tomu je v případě tuhých materiálů. Návrh metody měření a izolování přírodních vláknitých materiálů je podrobně popsán v kapitole 5.3.2.

5.2.3 Počáteční vlhkost

Při odvozování A_{cap} podle F – J metody vstupuje do výpočtu vlhkostní spád, který se vypočte jako:

$$\Delta w = \frac{(w_{cap} + w_{cri})}{2} - w_{ini}, \quad (5.2-1)$$

kde w_{ini} je počáteční vlhkost.

Z toho je zřejmé, že je nezbytné počáteční vlhkost při výpočtu A_{cap} znát, nicméně optimální hodnota pro měření se může lišit. Počáteční obsah vlhkosti by měl odpovídat účelu aplikace. Při měření A_{cap} pro zjištění nasákavosti stavebního materiálu při skladování na staveništi, nebo

nasákavosti obálky budovy při větrem hnaném dešti, může být vhodné předkondicionování vzorků, jak to požaduje norma ISO 15148, viz kapitola 3.1.

Hall navrhl vysušení v sušárně. [24] Tento způsob je vhodný pro účely další charakterizace materiálu, nebo pokud není účel zjišťování A_{cap} předem znám, díky své jasnosti, účinnosti a srovnatelnosti.

V případě této diplomové práce, kdy je účelem mimo jiné mezilaboratorní porovnání, je vhodnější úplné vysušení vzorků, které je provedeno dvěma způsoby – v exikátoru s vysoušedlem za laboratorní teploty a v sušárně při vyšších teplotách. Vhodnějším způsobem se ukázalo vysušení vzorků za laboratorní teploty, což je vysvětleno v následující kapitole.

5.2.4 Sušení vzorků

Jak již bylo zmíněno pro účely využití naměřených dat pro další charakterizaci materiálu nebo pro počítačové modely, je příhodnější úplné vysušení vzorků. Způsoby pro dosažení téměř nulové počáteční vlhkosti se mohou lišit a mohou zásadně ovlivňovat průběh absorpčního testu.

V této práci byly porovnány dva způsoby, a to sušení za vysoké teploty v sušárně a sušení vysoušedlem za laboratorní teploty.

V obou případech bylo sušení provedeno až do ustálení minimálně na hodnotu 0,1 % celkové hmotnosti vzorku během 24 h.

V případě sušení při laboratorní teplotě byly vzorky vloženy do exikátoru s molekulovým sítem, které dokáže adsorbovat molekuly vody.

Sušení v sušárně bylo provedeno vzduchem o teplotě 70 °C, nebo v případě přírodních materiálů 105 °C a 130 °C. Vzorky byly před každým vážením umístěny do exikátoru s molekulovým sítem pro vychladnutí a po zvážení byly opět umístěny do sušárny.

U vzorků kalcia-silikátu sušených vysokou teplotou bylo zjištěno, že ačkoli povrchová teplota vzorků již klesne přibližně na laboratorní teplotu, hmota uvnitř drží ještě poměrně dlouho vyšší teplotu, což ovlivňuje hmotnost vzorku.

Ohřátý vzduch například na 70 °C má hustotu $\rho=1,0292 \text{ kg/m}^3$, kdežto vzduch při laboratorní teplotě 23 °C má hustotu $\rho=1,1925 \text{ kg/m}^3$. To způsobuje, že vzorek je molekulami teplého vzduchu ve svých pórech „nadnášen“, měření se stává nepřesné a nelze na jeho základě určit míru vysušení. Je tedy třeba vzorky vždy nechat dostatečně vychladnout v řádu několika hodin. Proto je sušení vysoušedlem za laboratorní teploty spolehlivější.

Největší dopad mělo sušení při teplotě 105 °C a následně 130 °C na vzorky dřevovlákná. Tyto vzorky změnil v průběhu sušení svou barvu, rozměry a svou strukturu a vykazují mnohem menší kapilární absorpci, což je podrobně popsáno v kapitole 6.3.2.

5.2.5 Způsob uložení vzorků

Norma ISO 15148 uvádí, že vzorek má být uložen do nádrže s vodou na bodové podpěrky, které jej udržují 5 mm nad dnem.

V případě měkkých a neforemních materiálů je ale zajištění této podmínky problematické, a proto byl v této práci posuzován vliv podložky. Na základě i tohoto měření, byla navržena metoda pro zkoušení přírodních materiálů.

Na identických vzorcích kalcia-silikátu, tzn. stejný materiál se stejnou velikostí, způsobem izolování, počáteční vlhkostí i způsobem sušení, byla za jednotných podmínek prostředí, tzn. za stejné teploty vzduchu i vody, stejné vlhkosti a tlaku, měřena nasákavost při třech různých typech uložení:

- 3 opěrné body s minimální plochou, aby byl vzorek téměř celou plochou v kontaktu s vodou
- podložka z tahokovu
- buničina nasáklá vodou v kontaktu se vzorkem v celé ploše.

Cílem bylo zjistit míru ovlivnění nasákavosti podložkou z tahokovu omezující plochu vzorku v kontaktu s vodou a buničinou.

Jak je vidět z výsledků v kapitole 6.1.1, v případě podložky z tahokovu byly naměřeny téměř totožné výsledky jako v případě třech opěrných bodů.

Následně byl na vzorcích kalcia-silikátu ještě měřen vliv ruční a automatizované metody. Obě metody jsou popsány v kapitole 3.2. Z výsledků měření není jasný závěr, protože měření neproběhla za zcela totožných podmínek. Nicméně lze předpokládat negativní vliv na průběh křivky nasákavosti a absorpční koeficient při automatizované metodě, což je podrobněji popsáno v kapitole 6.1.2.

5.3 Použité metody měření

V následujících kapitolách budou podrobně popsány postupy měření použité v této práci. Pro kalcium-silikát, jakožto zástupce syntetických materiálů, byl použit odlišný postup než

v případě přírodních materiálů, pro které není normou dostatečně specifikovaná spolehlivá metoda měření, a proto byla snaha navrhnout novou metodu.

5.3.1 Metoda měření pro syntetické materiály

Experimentální postup v této práci byl v případě kalcia-silikátu odvozen podle normy ČSN EN ISO 15148. V kapitole 4.3 o ovlivňujících faktorech nasákavosti byly zmíněny některé požadavky normy, které byly upraveny podle předchozích zkušeností a na základě odborných článků.

Před zahájením procesu kapilární absorpce byly vzorky kalcia-silikátu o velikostech 4x4, 8x8 a 11x11 cm zaizolovány po stranách vzorku transparentním tmelem a následně sušeny. Některé vzorky byly sušeny v sušárně při 70 °C, některé při laboratorní teplotě v exikátoru s vysoušedlem – v obou případech při $RH \approx 0\%$ až do ustálení hmotnosti minimálně na $\pm 0,1\%$ hmotnosti vzorku během 24 hodin. Po vysušení byly vzorky bezkontaktně zaizolovány z horní strany. Následně byly umístěny do destilované vody o teplotě přibližně 23 °C na podložku z nerezové oceli (z přípravného experimentu nebyl zjištěn negativní vliv podložky na průběh zkoušky). Podložka byla ponořena 2-5 mm pod hladinu vody, tato hladina byla udržována pravidelným doplňováním.

V momentu kontaktu prvního vzorku s vodou byl spuštěn časovač. Po 1,5 minutě a pak v určených intervalech byly vzorky vždy vyndány z vody, jejich spodní povrch byl jemně ořten vlhkým hadříkem tak, aby na něm nezůstávaly kapky vody, osušené vzorky byly zváženy s přesností 0,001g a vráceny zpět na podložku. Tento proces byl proveden vždy během 30 s a postup se opakoval do dosažení téměř úplného nasycení vodou, což odpovídalo v tomto konkrétním případě přibližně 1,5 hod.

Podle normy má zkouška trvat 24 hodin, ale pokud se voda objeví na horním povrchu zkušební vzorku, zkouška se musí ukončit. U vzorků z kalcia-silikátu s výškou 4 cm je kapilárního nasycení vodou w_{cap} , tzn. dosažení horního povrchu vodou, dosaženo během 30 minut.

Doba, po kterou vzorky nebyly v kontaktu s vodou, byla zohledněna při zpracování dat.

5.3.2 Metoda pro přírodní vláknité materiály – návrh postupu

V případě přírodních vláknitých materiálů vystává obecně při měření jejich vlastností, a především při měření vlhkostních vlastností při kontaktu s vodou, několik mnoho problémů – například s měřením jejich plochy, zachování rozměrů v průběhu měření, jejich izolování apod.

V normě ČSN EN ISO 15148 je zmínka o nemožnosti izolování vláknitých materiálů o nízké objemové hmotnosti. Takové vzorky mohou být vloženy do trubky s ochranným pletivem na čelní straně roury. Více se touto problematikou norma nezabývá – např. specifikaci materiálu této trubky, aby svou nasákavostí neovlivňoval výsledky zkoušky, způsob vložení vzorku do trubky, aby nevznikla na rozhraní materiálů kapilární spára apod.

Experimentální metoda měření se v průběhu zpracování této práce vyvíjela. Na základě zjištěných nedostatků byla navržena metoda měření, která byla následně otestována na vzorcích z dřevovláknů a konopí.

Proto byly pro účely této práce vytvořeny speciální klíčky z tahokovu z nerezové oceli, které udávají přesnou plochu vzorků v kontaktu s vodou, která zůstává v průběhu zkoušky nezměněna. Klíčky navíc poskytují pevný rám pro izolování bočních stran vzorků bez vytvoření průběžné kapilární spáry, viz obr. 20.

Na základě přípravného experimentu na vzorcích kalcia-silikátu bylo dokázáno, že podložka z tahokovu průběh zkoušky negativně neovlivňuje, viz výsledky v kapitole 6.1.1.



Obr. 20: Speciální klíčky z tahokovu z nerezové oceli pro absorpční test vláknitých materiálů

Vzorky z dřevovláknů a konopí byly sušeny v exikátoru s vysoušedlem při laboratorní teplotě přibližně 23 °C, nebo v sušárně za působení teploty 105 °C jako v předchozím případě až do ustálení hmotnosti.

Po ustálení hmotnosti byly vzorky vloženy do klíček a zaizolovány z bočních stran asfaltovou páskou a z vrchní strany bezkontaktně lepicí páskou s ponechanými malými otvory. Následně byly ještě vloženy zpět do sušicího zařízení pro dosušení absorbované vlhkosti v průběhu izolování.

Ruční metoda měření se v případě vláknitých materiálů ukázala jako nepoužitelná. Při vyndávání vzorků z vody musí být vzorky drženy v dokonale vodorovné poloze, aby nasáknutá voda nevytekla ven podél vláken. To je při pravidelném opakování vyndání vzorku, osušení a vážení téměř neproveditelné.

Proto byly vzorky uchyceny do podvěsných digitálních vah, které zaznamenávaly kumulativní přírůstek hmotnosti automaticky pomocí počítačového programu v nastavených časových intervalech.

Tato metoda se ukázala být vhodnější, ale z experimentu na vzorcích kalcia-silikátu je patrné, že je průběh zkoušky automatizovanou metodou zatížen větší chybou než u ruční metody, což je podrobněji popsáno v kapitole 6.1.2.

5.4 Použité metody zpracování dat a metody porovnání výsledků

5.4.1 Metoda zpracování dat A_{cap} a w_{cap}

V případě kalcia-silikátu jsou zřetelně patrné obě fáze a přechod mezi nimi. Proto mohla být pro výpočet použita metoda lineární regrese, viz kapitola 3.5.1. U přírodních vláknitých materiálů je průběh 1. fáze nelineární. Proces byl však rozdělen na dva průběhy, pro které byl absorpční koeficient vyhodnocen zvlášť a koeficient spolehlivosti pro všechny průběhy se blíží 90 %, proto byla lineární regrese za těchto podmínek vyhodnocena jako dostačující.

Absorpční koeficient je vyjádřen vztahem:

$$\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot t^{\frac{1}{2}} + k_1, \quad (5.4-1)$$

Následně byl v případě kalcia-silikátu nalezen průsečík mezi 1. a 2. fází a dopočítán obsah vlhkosti kapilárního nasycení w_{cap} podle vzorce:

$$w_{cap} = \frac{(m_{wet} - m_{dry})}{A} \Big|_{cross} \cdot \frac{1}{H} \quad [\text{kg/m}^3]. \quad (5.4-2)$$

U přírodních materiálů nebylo nasyceného obsahu kapilární vlhkosti v průběhu měření vůbec dosaženo (podrobnější vysvětlení v kapitole 6.3.2).

5.4.2 Způsob stanovení nejistoty měření

Jak již bylo řečeno, žádné měření není zcela spolehlivé a u všech zkoušek existují chyby měření. Proto se k naměřeným výsledkům přidružuje tzv. nejistota měření. Nejistota měření

určuje rozptýlení hodnot, které by teoreticky také mohly být správným výsledkem daného měření. Nejčastěji bývá vyjádřena směrodatnou odchylkou (nebo jejím daným násobkem).

Podle normy ČSN ISO 21748 je pro interpretaci výsledků znalost nejistot výsledků měření základním požadavkem. Bez kvantitativních posouzení nejistoty není možné rozhodnout, například jestli pozorované rozdíly mezi výsledky vykazují větší než experimentální variabilitu nebo zda zkušební jednotky vyhovují specifikacím.

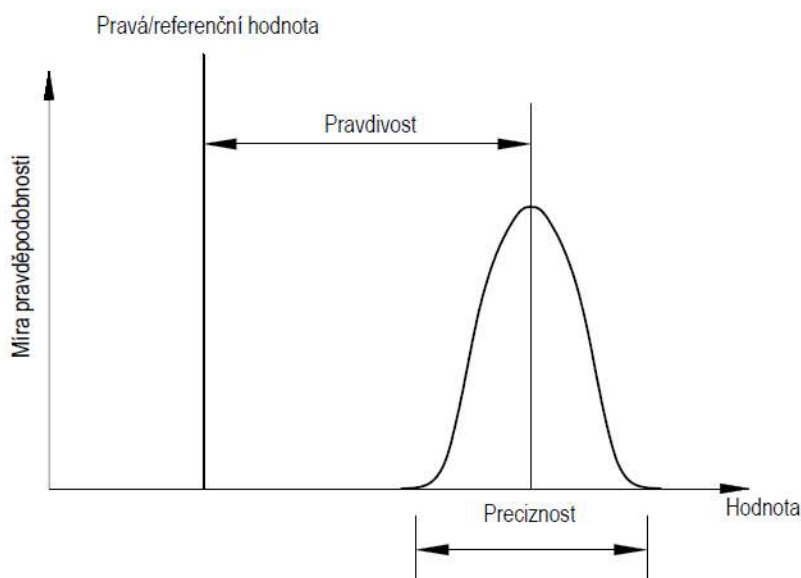
Postup při hodnocení nejistoty měření dle normy ČSN ISO 21748 [3]

- a) Z publikovaných informací o metodě se získají odhady opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a pravdivosti používané metody.
- b) Zjistí se, zda vychýlení laboratoře pro měření leží uvnitř rozmezí očekávaného na základě zjištěných informací.
- c) Zjistí se, zda preciznost dosažená běžným měřením leží uvnitř rozmezí očekávaného na základě odhadů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti získaných z publikovaných zdrojů.
- d) Identifikují se všechny vlivy na měření, které nebyly přiměřeně pokryty ve studiích a kvantifikuje se rozptyl, který mohl být vyvolán těmito vlivy, přičemž se započítají koeficienty citlivosti a nejistoty pro každý vliv.
- e) V případech, kde se prokáže, že vychýlení a preciznost jsou podle předchozích kroků ve zvládnutém stavu, se spojí odhad reprodukovatelnosti s nejistotou typu B – pravdivostí a vlivy dalších působících účinků [5.4.2.d)], čímž se vytvoří odhad kombinované nejistoty.

Experimentální část této práce se zabývá mimo jiné porovnáním výsledků na vzorcích kalcia-silikátu mezi laboratořemi UCEEB, UPV a výsledky měření z publikovaného článku od Chi Fenga a Hanse Janssen: Hygric properties of porous building materials (III) [7], čímž je zjišťována přesnost měření.

K popisu přesnosti metod měření používá norma ČSN ISO 5725-1 [25] dvou termínů – „pravdivost“ a „preciznost“. „Pravdivost“ se týká těsnosti shody mezi aritmetickým průměrem velkého počtu výsledků zkoušek a pravou nebo přijatou referenční hodnotou a je často popisována jako zkreslení. „Preciznost“ se týká těsnosti shody mezi výsledky zkoušek a je obvykle vyjádřena směrodatnou odchylkou.

To lze znázornit Gaussovo křivkou, vyjadřující normální Gaussovo rozdělení veličiny, viz následující obrázek:



Obr. 21: Pravdivost a preciznost (inspirováno [1])

Je zřejmé, že pravdivost se týká systematických chyb a preciznost popisuje náhodné chyby. Pravdivost lze většinou pouze odhadnout. Je to kvůli tomu, že skutečná hodnota často není dostupná. V důsledku toho je většinou analyzována preciznost, protože zahrnuje pouze naměřené výsledky. Ty jsou ovlivněny mnoha faktory. V první řadě by měla být brána v úvahu heterogenita materiálů. Některé materiály jako například kalcium-silikát jsou známé svou homogenitou, takže výsledky duplicitních vzorků při stejné zkoušce mohou být v rámci podrobnosti dostačující pro účely stavební fyziky téměř totožné. Většina materiálů ale není tak homogenní, což vede k větším rozdílům.

Vedle těchto chyb vycházející z heterogenity existují další faktory, které by měly být vzaty v úvahu. Podle normy ISO 5725 to jsou:

- a) Provozovatel
- b) Použité zařízení
- c) Kalibrace zařízení
- d) Prostředí (teplota, RH...)
- e) Čas, který uplynul mezi měřeními.

Dva extrémní případy preciznosti jsou reprodukovatelnost a opakovatelnost. První popisuje nejmenší a druhý největší variabilitu výsledků.

Pokud se používají stejné vzorky a všechny výše zmíněné faktory zůstávají při opakování zkoušek nezměněny a jsou provedeny v krátkém časovém intervalu, pak jsou tyto zkušební podmínky definovány jako podmínky opakovatelnosti a standardní odchylka výsledků je definována jako chyba opakovatelnosti.

Jak již bylo řečeno, v této práci byly zjišťovány mezilaboratorní chyby, tzn. zkouška byla prováděna za podmínek reprodukovatelnosti. Nezávislé výsledky měření se získávají stejnou metodou na identické měřicí jednotce v různých laboratořích s různým vybavením. Každý vzorek byl však měřen pouze jednou, proto jsou při výpočtech chyb reprodukovatelnosti chyby opakovatelnosti zanedbány.

Náhodné chyby – standardní nejistota typu A

Standardní nejistota absorpčního koeficientu typu A se vypočítá jako směrodatná odchylka aritmetického průměru podle vzorce:

$$u_{A,Acap} = S_{\overline{Acap}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (A_{cap} - \bar{A}_{cap})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (5.4-3)$$

V případě menšího počtu měření (vzorků) než 10 se výsledek vynásobí koeficientem k_x :

$$u_{A,Acap} = S_{\overline{Acap}} \cdot k_x, \quad (5.4-4),$$

| Počet naměřených hodnot n | Součinitel k_x |
|---------------------------|------------------|
| 2 | 7,0 |
| 3 | 2,3 |
| 4 | 1,7 |
| 5 | 1,4 |
| 6 | 1,3 |
| 7 | 1,3 |
| 8 | 1,2 |
| 9 | 1,2 |

Tab. 3: Koeficient k_x v závislosti na počtu měření (vzorků)

Takto vypočtená standardní nejistota typu A bude použita pro výpočet standardní kombinované nejistoty C absorpčního koeficientu pro jednotlivé laboratoře.

Následuje analýza pro zjištění mezilaboratorních chyb a chyb reprodukovatelnosti inspirována již zmíněným článkem od Chi Fenga, Hanse Janssen a dalších [1]. Pro pochopení této analýzy je třeba vysvětlit některá značení.

Výsledek testu vzorku i v testu j v laboratoři k bude označen $x_{i,j}^k$, kde i, j a k mají následující rozsah:

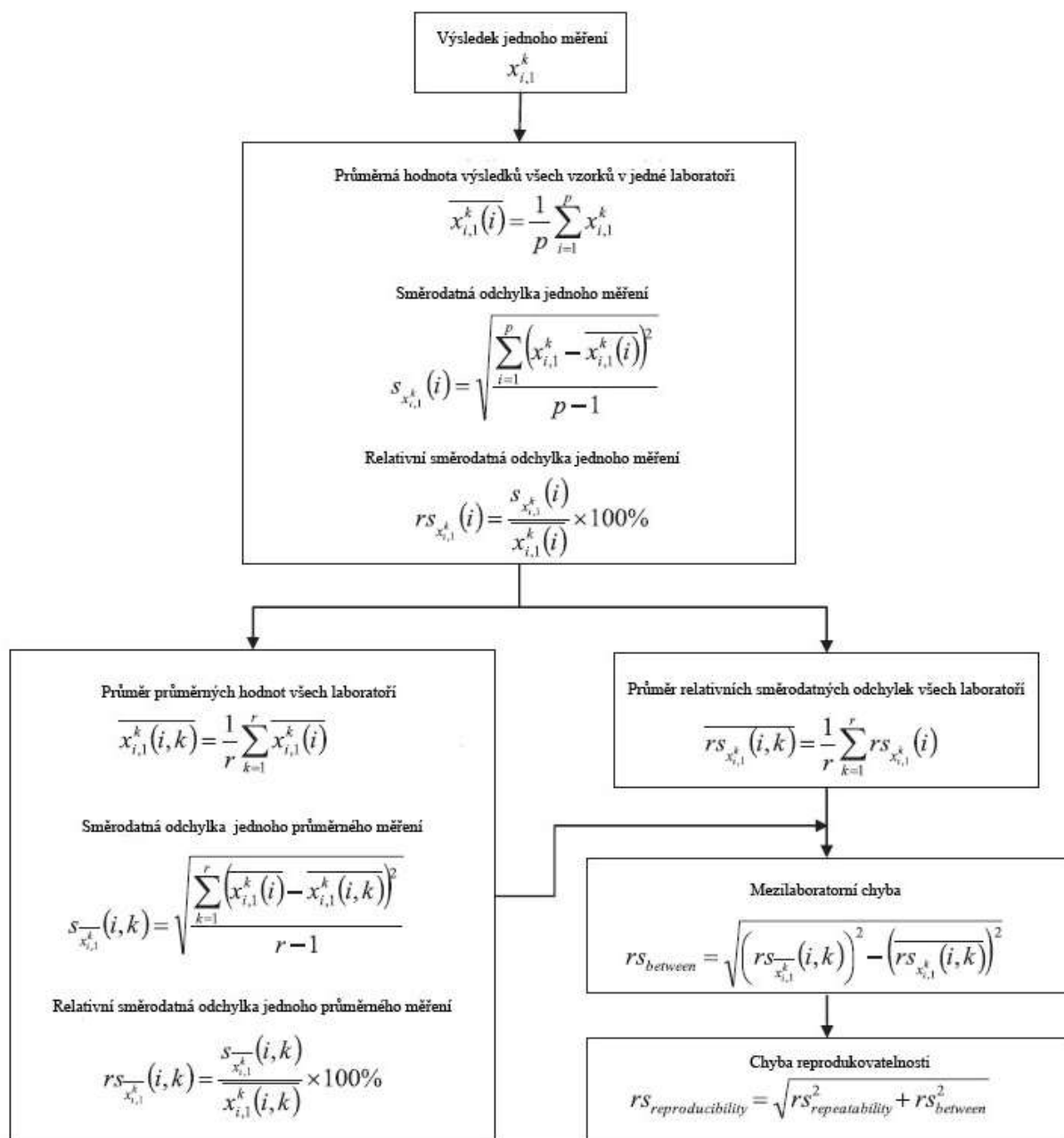
$$i \in [1; p], j \in [1; q], k \in [1; r].$$

Písmenka reprezentují počet vzorků, testů a laboratoří. Počet opakování v případě měření v laboratořích UCEEB a UPV je 1, proto $q=j=1$ a výsledek testu vzorku i v laboratoři k lze označit jako $x_{i,l}^k$.

Směrodatná odchylka jednoho měření je značena s a pro lepší porovnání výsledků je zavedena relativní směrodatná odchylka rs . Písmeno v závorce udává, na jaký faktor se provádí výpočet a pokud je písmen v závorce více, jejich pořadí udává pořadí výpočtu. Například: $rs_{xi}^k(i, k)$ znamená, že je vypočítán nejdřív průměrný výsledek stejných vzorků a pak je vypočítána směrodatná odchylka pro jedno měření ve všech laboratořích.

Detailní výpočetní proces je naznačen ve vzorcích:

(5.4-5)



Obr. 22: Proces výpočtu chyby reprodukovatelnosti (inspirováno [1])

Systematické chyby – standardní nejistota typu B

Systematické chyby jsou vyjádřením pravdivosti. V této práci byly započteny všechny vlivy vstupující do výpočtu absorpčního koeficientu A_{cap} lineární regresí (viz rovnice 5.4-1), tzn. byla započítána možná chyba přesnosti měření hmotnosti, kalibrace vah, možná chyba měření rozměrů, přesnosti šuplery a přesnosti měření času.

Kromě těchto byl v rámci jednotlivých veličin započítán vliv tahokovu, který zmenšuje efektivní plochu vzorku, vliv kolísání teploty, který mění viskozitu vody a objevuje se ve změně

hmotnosti, kterou ovlivňuje také způsob měření (ruční nebo automatizovanou metodou) a způsob sušení.

Vzorec pro výpočet absorpčního koeficientu lineární regresí:

$$\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot t^{\frac{1}{2}} + k_1, \quad (5.4-6)$$

Následuje podrobný postup započítání standardní nejistoty absorpčního koeficientu typu B pro jednotlivé vlivy.

1) Hmotnost

a) Vliv kalibrace měřícího zařízení

Standardní nejistota použitých vah je uvedena v jejich kalibračním listu. Pokud je uváděna rozšířená nejistota, je nutné ji vydělit použitým koeficientem rozšíření k . V laboratoři UCEEB byly použity váhy s rozšířenou nejistotou $U_{mv} = 0,0014\text{g}$ a v laboratoři UPV s rozšířenou nejistotou $U_{mi} = 0,001\text{g}$.

$$u_{m_z} = \frac{U_{mz}}{k} \quad (5.4-7)$$

b) Vliv nepřesností měření provozovatelem

Standardní nejistota se určí empiricky. Maximální chyba hmotnosti vzorku vlivem nepřesnosti provozovatele se započtením ostatních vlivů je přibližně $\Delta u_{m_0} = 1\text{ g}$. Uvažuje se Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti (koeficient $\chi = 3$).

$$u_{m_0} = \frac{\Delta u_{m_0}}{\chi}, \quad (5.4-8)$$

Oba vlivy jsou sečteny podle vzorce:

$$u_m = \sqrt{u_{m_z}^2 + u_{m_0}^2}, \quad (5.4-9)$$

c) Rozdíl hmotnosti

Určí se citlivostní koeficienty (parciální derivace) vzorce:

$$\Delta m = m_{wet} - m_{dry}, \quad (5.4-10)$$

kde m_{wet} je hmotnost nasáklého vzorku na konci měření [kg] a m_{dry} je hmotnost suchého vzorku na začátku měření [kg]

tedy:

$$A_{u_{m_{wet}}} = \frac{\partial \Delta m}{\partial m_{wet}} = 1; \quad A_{u_{m_{dry}}} = \frac{\partial \Delta m}{\partial m_{dry}} = -1. \quad (5.4-11)$$

Standardní nejistota rozdílu hmotnosti je dána rovnicí:

$$u_{\Delta m} = \sqrt{A_{u_{m_{wet}}}^2 \cdot u_m^2 + A_{u_{m_{dry}}}^2 \cdot u_m^2}, \quad (5.4-12)$$

kde $u_{\Delta m}$ je nejistota stanovení rozdílu hmotností [kg] a u_m je nejistota stanovení hmotnosti (standardní nejistota vah s vlivem provozovatele) [kg].

2) Nejistota zkušební plochy vzorku

a) Vliv přesnosti měřicího zařízení

Vliv přesnosti měřicího zařízení se určí na základě nejistoty uvedené v kalibračním listu měřidla $U_{A_s} = \pm 0,02 \text{ mm}$.

$$u_{A_z} = \frac{U_{A_z}}{k}, \quad (5.4-13)$$

b) Vliv nepřesnosti měření provozovatelem

Použije se stejný postup jako u nepřesnosti měření hmotnosti provozovatelem, viz 1 b).

Pro sečtení obou vlivů se použije vzorec:

$$u_{A_s} = \sqrt{u_{A_z}^2 + u_{A_o}^2}, \quad (5.4-14)$$

Určí se citlivostní koeficienty (parciální derivace) vzorce:

$$A = a \cdot b, \quad (5.4-15)$$

kde a a b [m] jsou délky strany vzorku,

tedy:

$$A_{u_a} = \frac{\partial A}{\partial a} = b; \quad A_{u_b} = \frac{\partial A}{\partial b} = a. \quad (5.4-16)$$

Standardní nejistota stanovení plochy je dána rovnicí:

$$u_A = \sqrt{A_{u_a}^2 \cdot u_{A_s}^2 + A_{u_b}^2 \cdot u_{A_s}^2}, \quad (5.4-17)$$

kde u_A je nejistota stanovení plochy (standardní nejistota měřicího zařízení s vlivem provozovatele) [m].

3) Nejistota času

a) Vliv přesnosti měřícího zařízení

Podle empirie se uvažuje vliv přesnosti měřícího zařízení – stopek $\Delta t_z = \pm 0,1s$. Uvažuje se stejnoměrné rozdělení pravděpodobnosti (koeficient $\chi = \sqrt{3}$).

$$u_{t_z} = \frac{\Delta t_z}{\chi}, \quad (5.4-18)$$

b) Vliv nepřesnosti měření provozovatelem

Stejný postup se použije v případě standardní nejistoty vlivem nepřesnosti měření provozovatelem u ruční metody měření, kde se v tomto případě uvažuje reakční doba 1 s a Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti (koeficient $\chi = 3$).

Oba tyto vlivy se sečtou pomocí vzorce:

$$u_{t_s} = \sqrt{u_{t_z}^2 + u_{t_o}^2} \quad (5.4-19)$$

Určí se citlivostní koeficienty (parciální derivace) funkce:

$$f(t) = \sqrt{t}, \quad (5.4-20)$$

kde t značí uplynutý čas v sekundách,

tedy:

$$A_{u_t} = \frac{\partial f(t)}{\partial t} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{t}} \quad (5.4-21)$$

Standardní nejistota stanovení plochy je dána rovnicí:

$$u_t = \sqrt{A_{u_t}^2 \cdot u_{t_s}^2} \quad (5.4-22)$$

Následně se určí citlivostní koeficienty stanovení nejistoty absorpčního koeficientu:

$$A_{u_{\Delta m}} = \frac{\partial A_{cap}}{\partial \Delta m} = \frac{1}{A \cdot t^{\frac{1}{2}}} \quad (5.4-23)$$

$$A_{u_A} = \frac{\partial A_{cap}}{\partial A} = \frac{\Delta m}{(A^2 \cdot t^{\frac{1}{2}})} \quad (5.4-24)$$

$$A_{u_t} = \frac{\partial A_{cap}}{\partial t} = \frac{\Delta m}{A \cdot t^{\frac{3}{2}}} - \frac{k_1}{t^{\frac{3}{2}}} \quad (5.4-25)$$

Standardní nejistota absorpčního koeficientu typu B se vypočítá následovně:

$$u_{A_{cap}B} = \sqrt{A_{u_{\Delta m}}^2 \cdot u_{\Delta m}^2 + A_{u_A}^2 \cdot u_A^2 + A_{u_t}^2 \cdot u_t^2}, \quad (5.4-26)$$

Standardní kombinovaná nejistota absorpčního koeficientu – typu C

Kombinace nejistoty typu A a typu B se provede dle vztahu:

$$u_{C,A_{cap}} = \sqrt{u_{A,A_{cap}}^2 + u_{B,A_{cap}}^2}. \quad (5.4-27)$$

Rozšířená nejistota absorpčního koeficientu

Rozšířená nejistota se následně vypočítá vynásobením standardní kombinované nejistoty koeficientem rozšíření $k=2$, což odpovídá při normálním rozdělení přibližně 95 % spolehlivosti, že výsledek leží v daném intervalu.

$$U_{A_{cap}} = u_{C,A_{cap}} \cdot k. \quad (5.4-28)$$

Vzhledem k tomu, že je absorpční koeficient A_{cap} obecně definován jako tangenta nárůstu kumulovaného obsahu vody poděleného odmocninou z času, je nejistota také vyjádřena jako tangenta, což je znázorněno v grafech v kapitole 6.1.2.

6 Výsledky měření nasákavosti, porovnání a diskuze

V následujících kapitolách jsou výsledky měření zpracovány do tabulek a grafů.

Pro lepší orientaci v textu a návaznost jsou výsledky okomentovány zvlášť pro jednotlivé materiály v dílčích podkapitolách. Poté následuje porovnání a souhrnná tabulka absorpčních koeficientů a součinitelů vlhkostní vodivosti všech měřených materiálů.

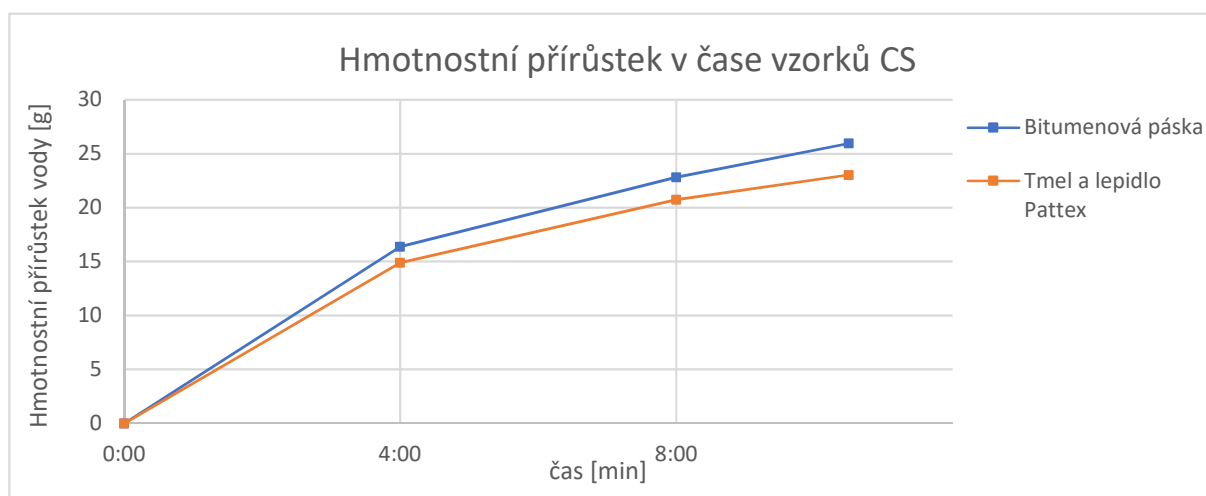
6.1 Kalcium-silikát

Na vzorcích CS byly měřeny nejdříve přípravné experimenty pro zjištění dopadu zmíněných ovlivňujících faktorů. Z těchto experimentů byla stanovena vhodná velikost vzorků a materiál pro izolování bočních stran před měřením samotné nasákavosti pro vyhodnocení absorpčního koeficientu, stanovení nejistot měření a zjištění mezilaboratorních chyb. Poté byla naměřená data tohoto materiálu použita jako vstupní údaje v programu WUFI.

6.1.1 Výsledky měření

Přípravný experiment – vliv izolování vzorků

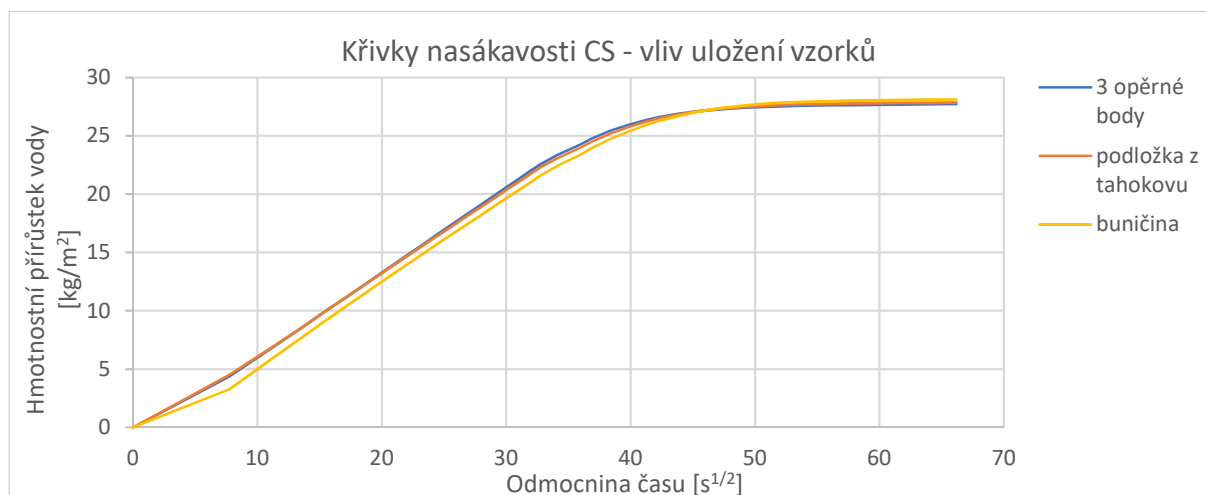
Pro tento experiment byly použity dva vzorky o stejné kontaktní ploše 4x4 cm, proto je možné porovnat vliv izolování pouze vykreslením hmotnostního přírůstku v gramech za jednotku času, viz následující graf. Vzorky byly předem kondicionovány na laboratorní podmínky. Jeden ze vzorků byl zaizolován asfaltovou páskou, druhý transparentním tmelem a lepidlem Pattex pro zjištění vlivu izolantu na absorpční proces.



Obr. 23: Grafické porovnání způsobu izolování bočních stran vzorků CS

Přípravný experiment – vliv uložení vzorků

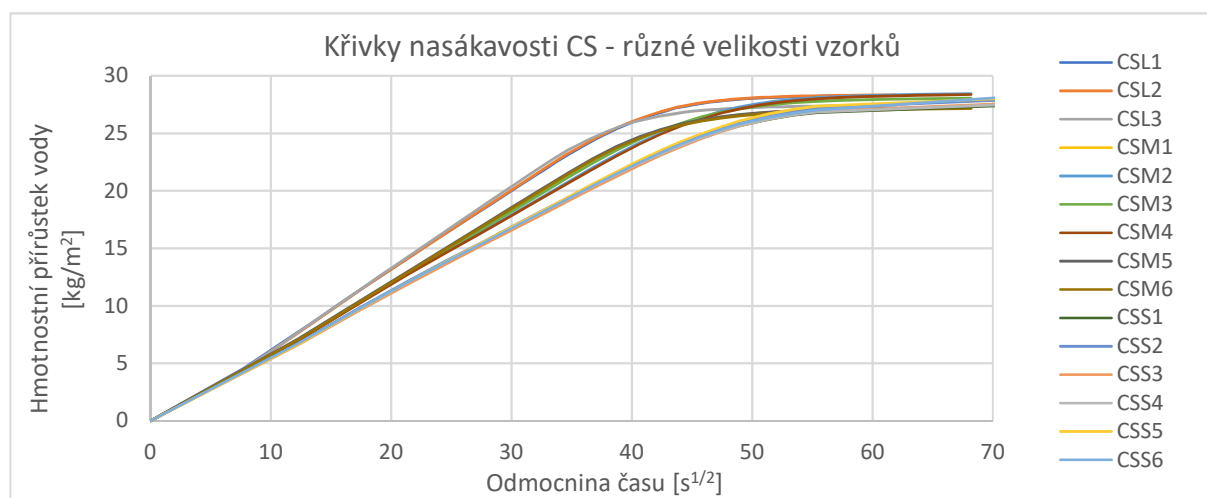
Následující graf zobrazuje průměrné křivky nasákavosti pro jednotlivé způsoby uložení. Pro každou variantu bylo použito 5 vzorků o velikosti kontaktní plochy 11x11 cm a výšce 4 cm. Všechny vzorky byly zaizolovány z bočních stran transparentním tmelem Pattex, před měřením byly plně vysušeny a byly měřeny za totožných laboratorních podmínek.



Obr. 24: Grafické porovnání různého způsobu uložení vzorků CS do vody

Měření vlivu velikosti vzorků

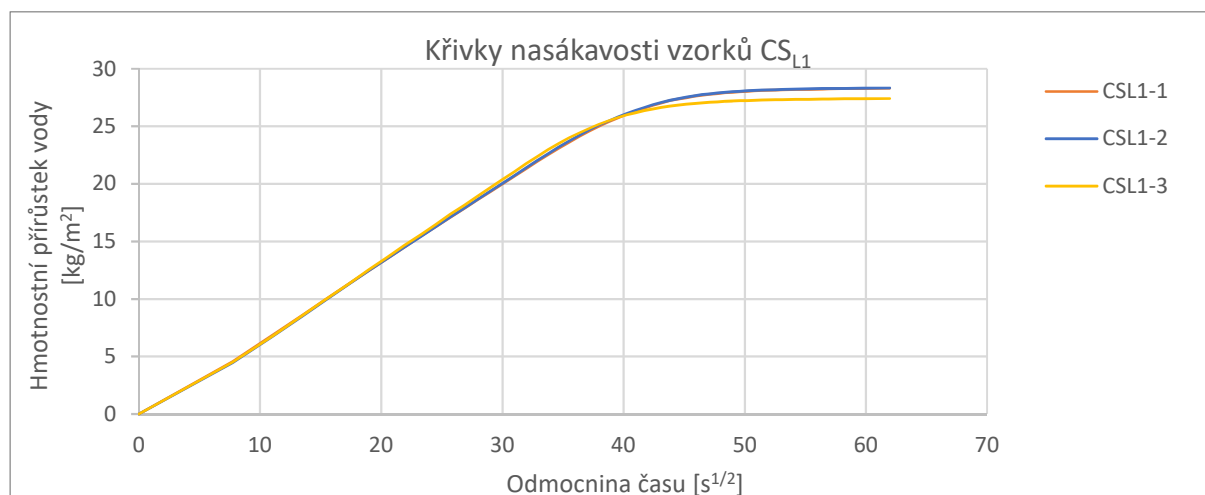
Pro zjištění vlivu velikosti vzorků byla měřena nasákavost na třech vzorcích CS o velikosti kontaktní plochy 11x11 cm a na šesti vzorcích pro každou velikost kontaktní plochy 8x8 a 4x4 cm. V grafu jsou znázorněny křivky nasákavosti. Největší vzorky jsou značeny CSL_i, střední vzorky CSM_i a nejmenší CSS_i, kde *i* značí příslušné číslo vzorku.



Obr. 25: Grafické porovnání různých velikostí vzorků CS

Výsledky měření nasákavosti v laboratoři UCEEB pro výpočet A_{cap} a stanovení nejistot

Pro další výpočty a vyhodnocení byly použity pouze vzorky o kontaktní ploše 11x11 cm, zaizolované tmelem Pattex a měřené ruční metodou. Jednička v označení CS_{L1-i} znamená 1. měření – v laboratoři UCEEB, kde byly měřeny pro další výpočty 3 vzorky.

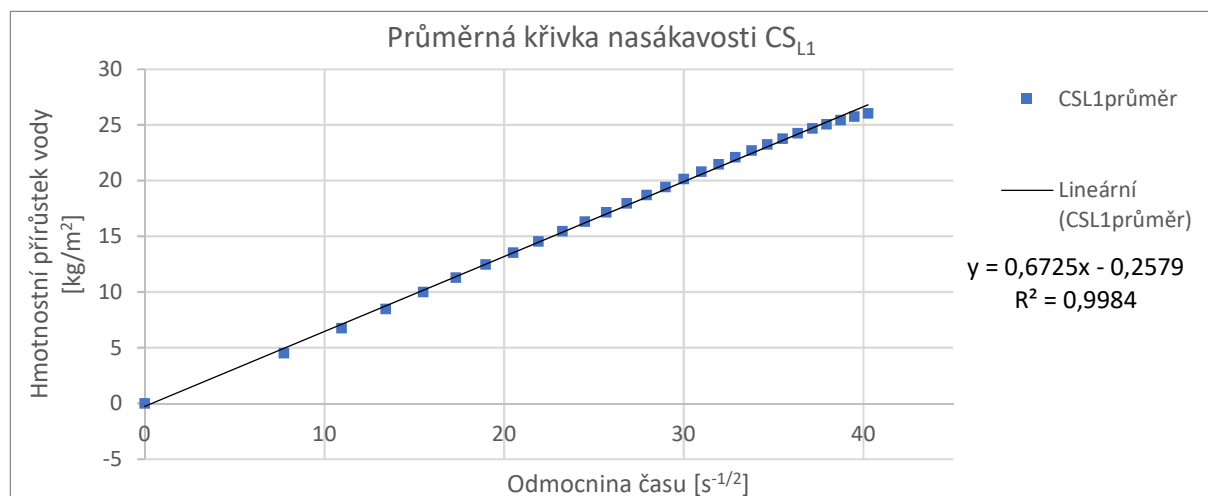


Obr. 26: Výsledné křivky nasákavosti vzorků CS v laboratoři UCEEB

Hodnoty přírůstků hmotnosti vzorků CS_{L1-1} až CS_{L1-3} jsou téměř totožné se zanedbatelnou chybou. Jsou zprůměrovány a vykresleny v jedné křivce pro výpočet absorpčního koeficientu. Pro výpočet jsou použita naměřená data během prvních 30 minut experimentu, což odpovídá 1. fázi kapilárního procesu.

Rovnice spojnice trendu, tj. tangenty: $y = 0,6725x - 0,2579$ lze přepsat na tvar rovnice vyjádření absorpčního koeficientu lineární regresí: $\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot t^{\frac{1}{2}} + k_1$, kde kumulativní přírůstek hmotnosti vztažený na plochu je vykreslen na ose y, odmocnina z času je proměnná x a k_1 je konstanta vyjádřena posunutím na ose y. Absorpční koeficient A_{cap} je v tomto případě $0,6725 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$.

Koeficient determinace R^2 popisuje míru vhodnosti použití regresní rovnice. Hodnoty blízké 1 naznačují, že rovnice je velmi vhodná pro extrapolaci.



Obr. 27: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků CS měřených v laboratoři UCEEB

V následující tabulce jsou srovnány absorpční koeficienty A_{cap} jednotlivých vzorků měřených v laboratoři UCEEB, jejich rovnice lineární regrese a koeficient determinace R^2 .

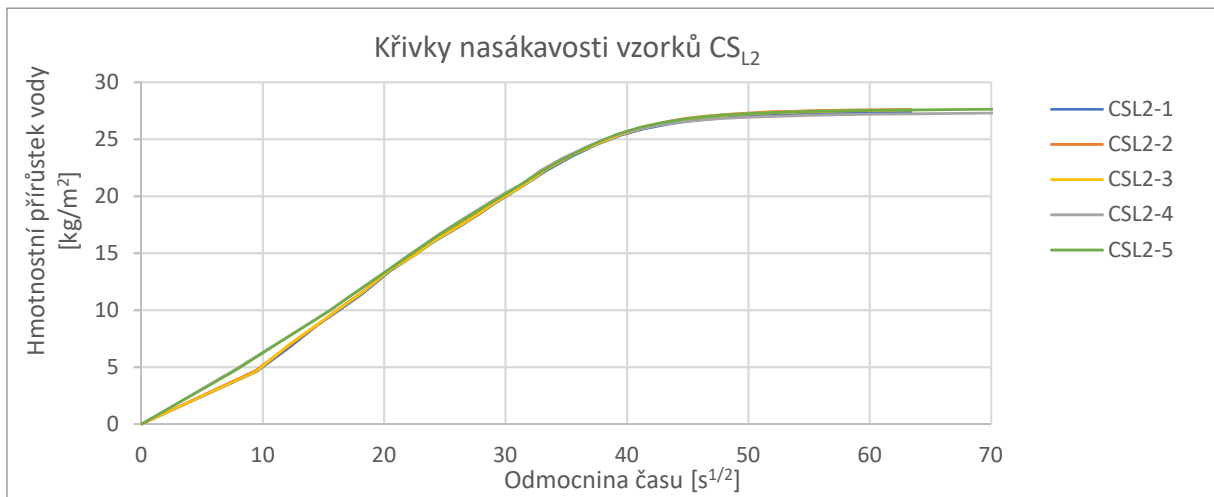
| Označení | A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | Rovnice lineární regrese | R^2 [-] |
|--------------------|---|--------------------------|--------------|
| CS _{L1-1} | 0,6707 | $y=0,6707x-0,2645$ | 0,9992 |
| CS _{L1-2} | 0,6762 | $y=0,6762x-0,3741$ | 0,9991 |
| CS _{L1-3} | 0,6821 | $y=0,6821x-0,3531$ | 0,9981 |

Tab. 4: Výsledky jednotlivých vzorků CS měřených v laboratoři UCEEB

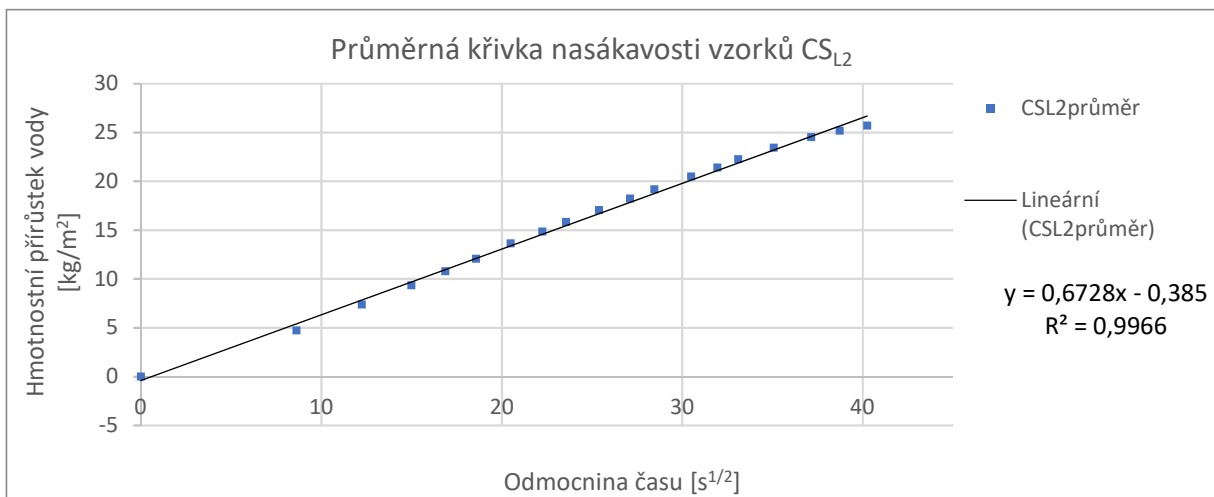
Výsledky měření nasákavosti v laboratoři UPV pro výpočet A_{cap} a stanovení nejistot

Za podmínek reprodukovatelnosti byla nasákavost naměřena také v laboratoři UPV – což je vyjádřeno dvojkou v značce CS_{L2-i} . V této laboratoři bylo měřeno 5 identických vzorků ruční metodou a 3 vzorky automatizovanou metodou, značeno trojkou.

Výsledky ruční metody jsou zpracovány totožně jako v případě výsledků z laboratoře UCEEB.



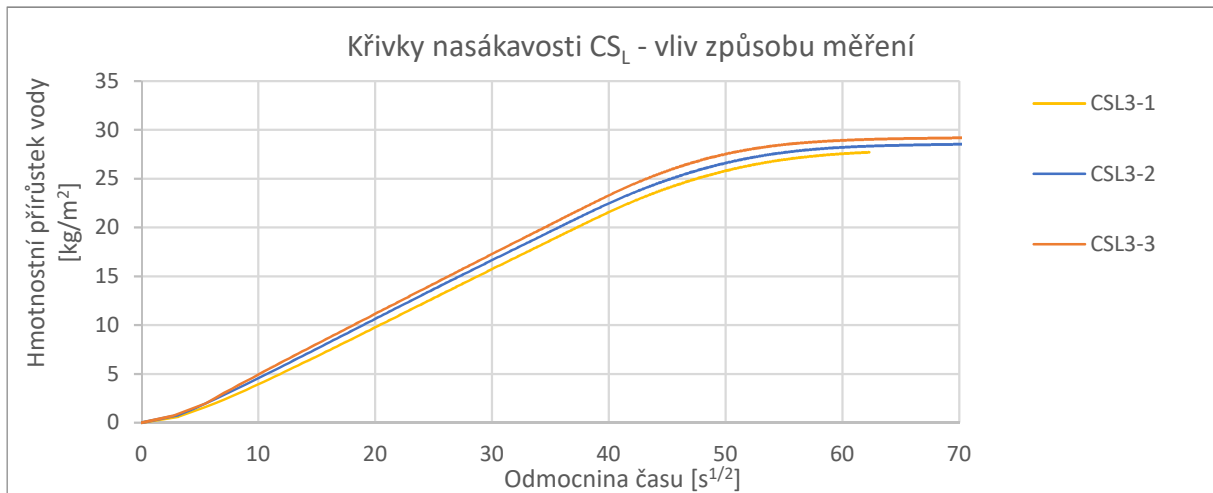
Obr. 28: Výsledné křivky nasákavosti vzorků CS v laboratoři UPV



Obr. 29: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze nasákavosti vzorků CS měřených v laboratoři UPV

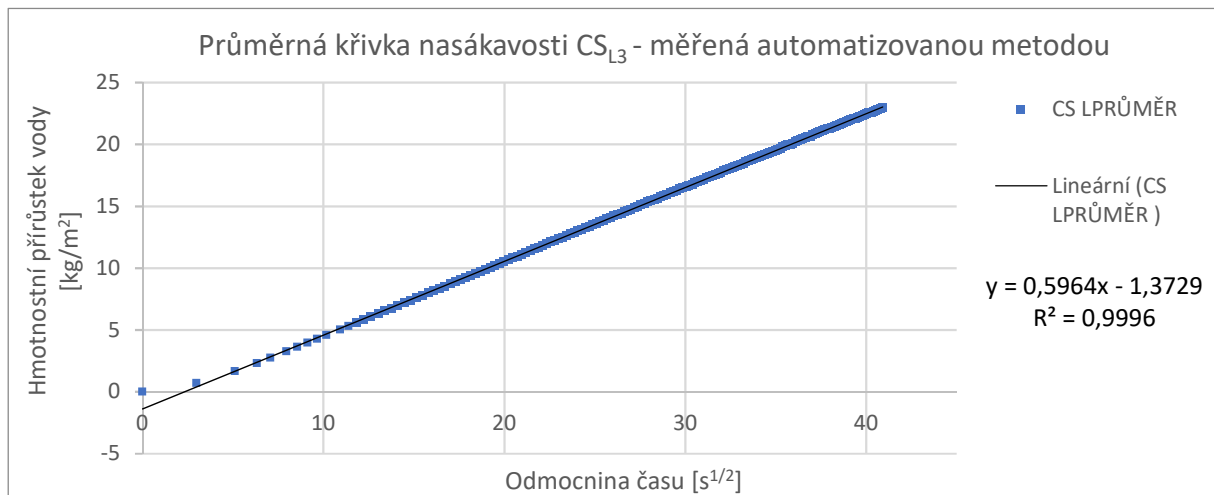
Automatizovaná metoda

V laboratoři UPV byl zjišťován vliv způsobu měření. V následujícím grafu jsou vidět křivky nasákavosti třech vzorků, které byly měřeny z podvěsu na digitálních vahách. Všechny vzorky měly stejnou velikost a byly stejně zaizolovány.



Obr. 30: Výsledné křivky nasákavosti vzorků CS_L měřené automatizovanou metodou

Výsledky automatizované metody byly zprůměrovány a vykresleny do jedné křivky nasákavosti pro zjištění absorpčního koeficientu a možnost numerického porovnání automatizované a ruční metody. Všechny výsledky z laboratoře UPV jsou srovnány v tabulce č. 5.



Obr. 31: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze nasákavosti vzorků CS měřené automatizovanou metodou

| Označení | A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | Rovnice lineární regrese | R ² [-] |
|--------------------|---|-----------------------------|-----------------------|
| CS _{L2-1} | 0,685 | $y = 0,685x - 0,8831$ | 0,9954 |
| CS _{L2-2} | 0,6882 | $y = 0,6882x - 0,8252$ | 0,9959 |
| CS _{L2-3} | 0,6854 | $y = 0,6854x - 0,8183$ | 0,9958 |
| CS _{L2-4} | 0,6707 | $y = 0,6707x - 0,1093$ | 0,9981 |
| CS _{L2-5} | 0,6701 | $y = 0,6701x - 0,1346$ | 0,9984 |
| CS _{L3-1} | 0,5848 | $y = 0,5848x - 1,831$ | 0,9991 |
| CS _{L3-2} | 0,5953 | $y = 0,5953x - 1,2493$ | 0,9996 |
| CS _{L3-3} | 0,6106 | $y = 0,6106x - 1,0693$ | 0,9997 |

Tab. 5: Výsledky jednotlivých vzorků CS měřených v laboratoři UPV

6.1.2 Porovnání a diskuze

Vliv materiálu pro izolování bočních stran

Byly porovnány dva nepropustné materiály pro izolování bočních stran vzorků – asfaltová páska a transparentní tmel a lepidlo Pattex.

Z grafu (Obr. 23) vyplývá, že vzorky izolované bitumenovou páskou mají větší nasákavost. To bylo, jak ukazují další absorpční testy, pravděpodobně mylně přisouzeno zvýšené kapilární nasákavosti ve spáře mezi zkoušeným vzorkem a páskou, kvůli nedostatečné přilnavosti pásky k prášivému povrchu kalcia-silikátu, jak je vidět na fotografii Obr. 32 b.



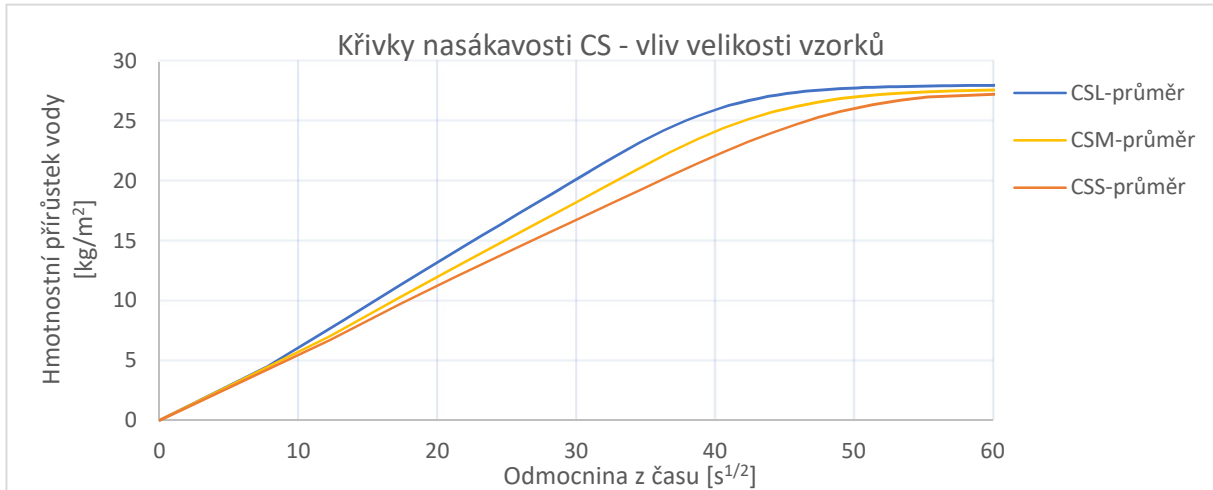
Obr. 32: Porovnání materiálů pro izolování bočních stran kalcia-silikátu:

vlevo (a) transparentní tmel a lepidlo Pattex; vpravo (b) asfaltová páska

Test byl ukončen v průběhu 1. fáze kapilární absorpce, tzn. před dosažením vody k hornímu povrchu vzorku a vzorky byly rozříznuty pro vizuální vyhodnocení. V případě izolování transparentním tmelem je vidět lehce konkávní průběh vody, což bylo vyhodnoceno jako přirozený průběh a pro samotný absorpční experiment byl proto zvolen jako vhodný materiál právě tento tmel. Jak je ale z následujících vyhodnocení patrné, tmel před zaschnutím pronikl do vzorků, což zmenšilo účinnou průřezovou plochu vzorků.

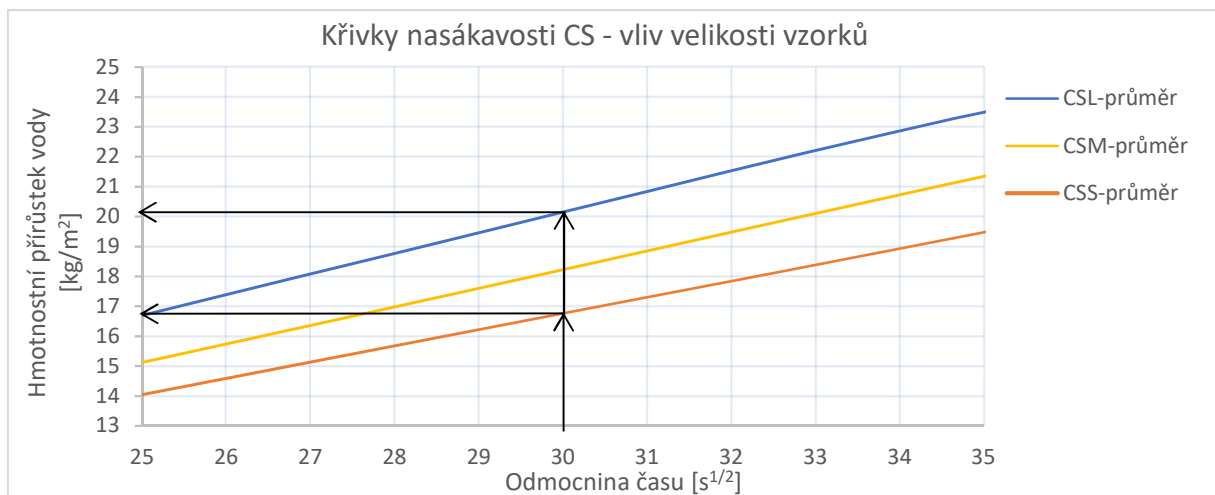
Vliv velikosti vzorků se současným působením okrajových podmínek

Jak je vidět z výsledků v grafu obr. 25, průběhy kapilární absorpce v první fázi u jednotlivých velikostí vzorků jsou téměř totožné, proto byly pro přehlednost v následujících grafech vykresleny průměrné hodnoty.



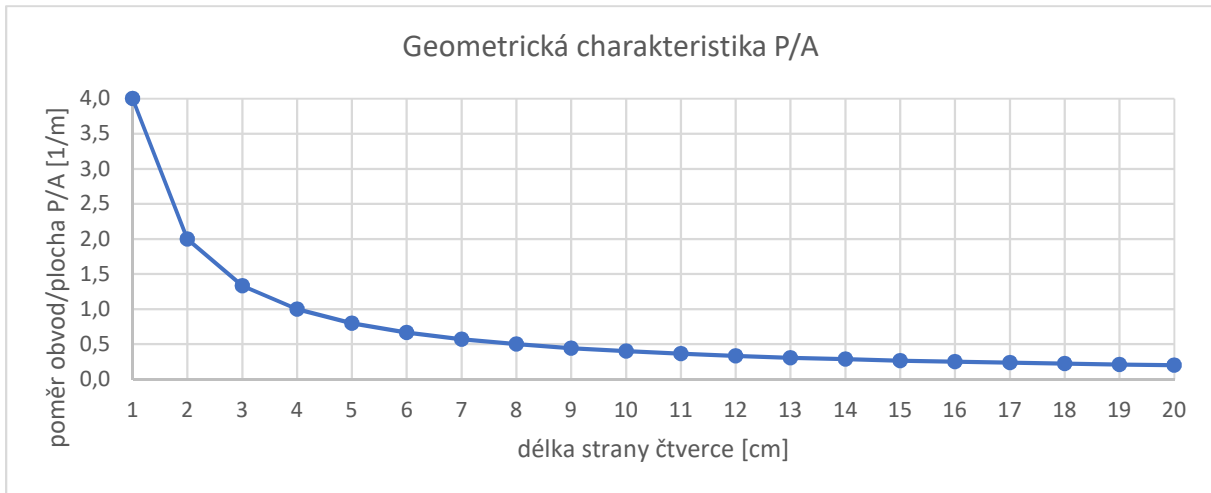
Obr. 33: Grafické porovnání nasákavosti CS v závislosti na velikosti vzorků

Vzorky CS_s o délce strany 4 cm mají v čase 30 s^{1/2}, což odpovídá 15. minutám, průměrný kumulativní přírůstek hmotnosti 16,75 kg/m², kdežto vzorky CS_L o délce strany 11 cm mají ve stejném čase průměrný kumulativní hmotnostní přírůstek 20,2 kg/m². Velikost vzorku sama o sobě pravděpodobně vliv na nasákavost nemá, ale se současným působením okrajových podmínek je vliv tím větší, čím větší je poměr obvodu ku ploše vzorku.



Obr. 34: Grafické porovnání nasákavosti CS v závislosti na velikosti vzorků – detailní zobrazení

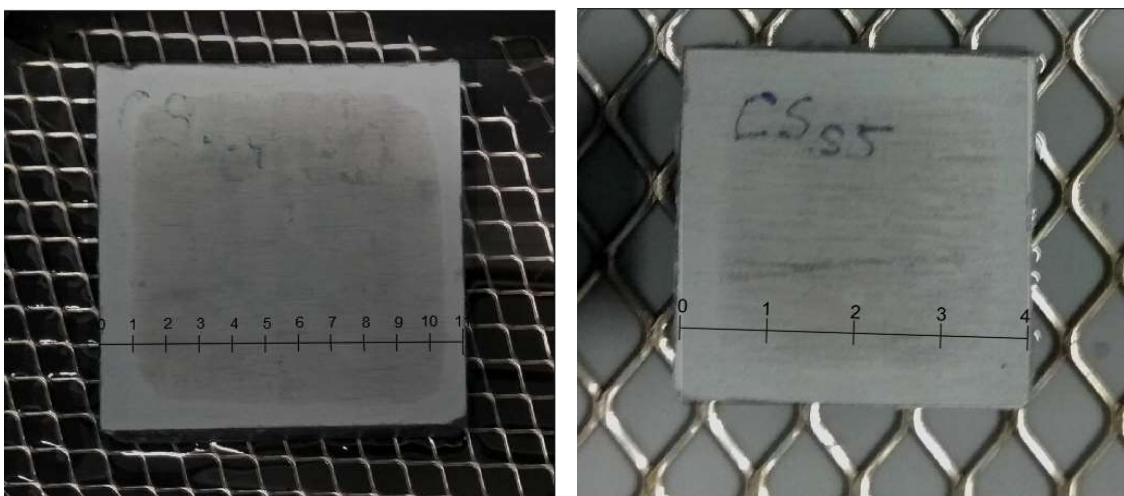
Obvod čtverce $P = 4 \cdot a$ [m] roste s délkou jeho strany lineárně, kdežto plocha čtverce $A = a^2$ [m²] roste s délkou strany kvadraticky. Tyto funkce se protínají při délce strany 4 cm, tzn. poměr obvodu ku ploše čtverce je v tomto bodě rovno jedné a se zmenšující se stranou čtverce poměr obvodu ku ploše roste mnohem rychleji, viz obr. 35.



Obr. 35: Geometrické znázornění poměru obvodu ku ploše čtverce v závislosti na délce strany

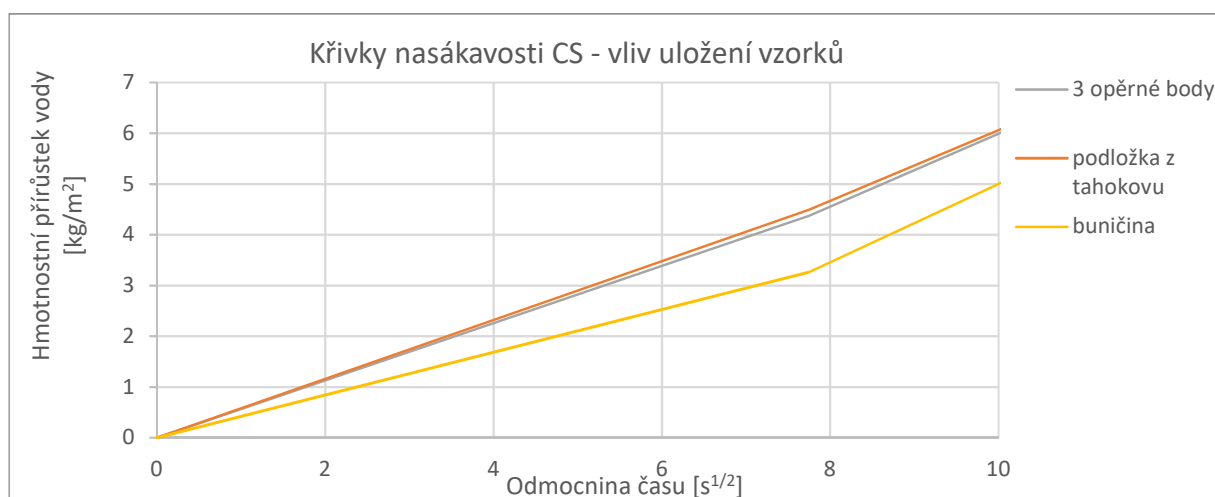
Nasákavost po stranách vzorku má jiný průběh než v ploše vzorku, protože je ovlivněna izolujícím materiálem. Při příliš malé ploše vzorku, a tudíž větším poměru obvodu ku ploše vzorku je tento vliv nezanedbatelný a měl by být brán v úvahu při volbě velikosti zkušebních vzorků.

Menší nasákavost po stranách kalcia-silikátu zaizolovaného transparentním tmelem Pattex vyplývající z grafů 34 a 35, dokazují také následující fotografie z měření, na kterých lze dobře porovnat ovlivnění v závislosti na velikosti vzorku.



Obr. 36: Porovnání vlivu izolování bočních stran v závislosti na velikosti vzorku

Vliv způsobu uložení vzorků



Obr. 37: Detailní geometrické znázornění vlivu uložení vzorků

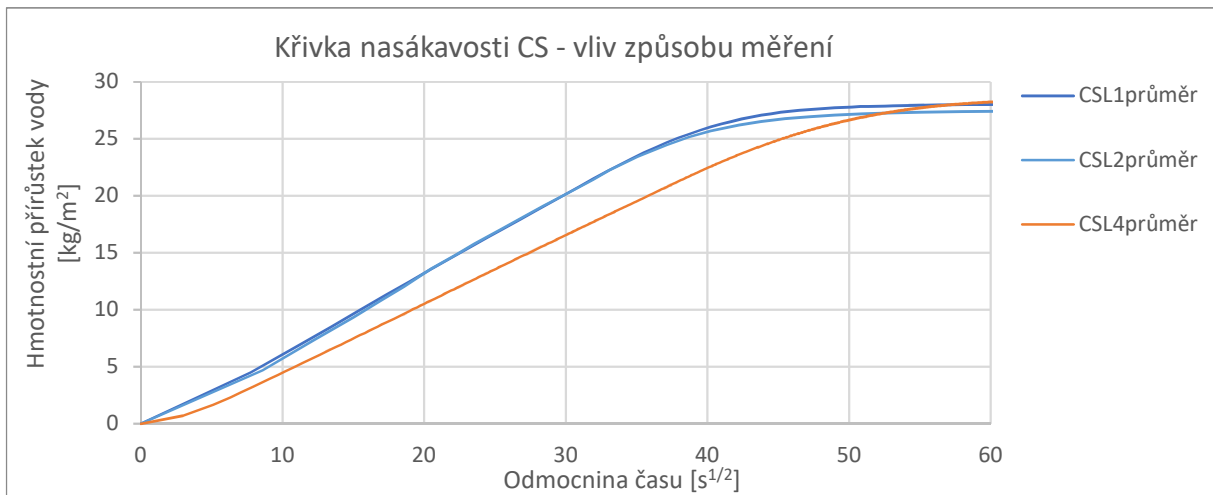
Výsledky na všech vzorcích pro jednotlivé způsoby uložení byly téměř totožné, v grafech jsou pro přehlednost hodnoty zprůměrovány.

Je vidět, že podložka z tahokovu na průběh zkoušky nemá vliv. U vzorků, které jsou v plné ploše v kontaktu s nasáknutou buničinou, je na začátku zkoušky zaznamenán menší hmotnostní přírůstek, který je ale v průběhu zkoušky vyrovnán. V čase $8 \text{ s}^{-1/2}$, což odpovídá jedné minutě, je kumulativní přírůstek hmotnosti u vzorků podložených buničinou o více než 1 kg/m^2 menší než u ostatních vzorků. Na celkový absorpční koeficient ale nemá podložení vzorků buničinou negativní vliv. Naopak u dlouhodobých zkoušek některých materiálů např. dřeva, může být tento způsob měření výhodný. Udržuje vzorky stále v kontaktu s vodou i pro případ, že by hladina vody v nádrži nebyla v čase konstantní.

Vliv použité metody měření

Jak je vidět z grafu 30, průběhy jednotlivých vzorků nejsou tak jednotné, jako u ruční metody. To dokazuje jistý negativní vliv měření automatizovanou metodou. Je to pravděpodobně způsobeno počáteční nesmáčivostí povrchu a vytvořením vzduchových bublin pod zavěšenými vzorky, které jsou různé pro každé měření. V případě ruční metody jsou tyto jevy eliminovány otřením povrchu vzorku vlhkým hadříkem.

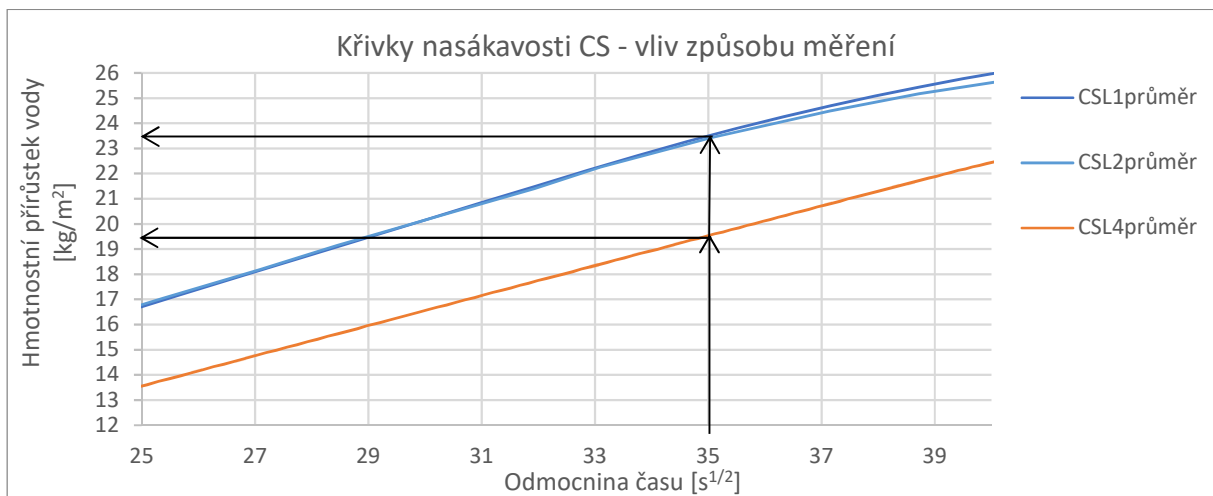
V následujícím grafu jsou vykresleny křivky nasákavosti průměrů z jednotlivých měření.



Obr. 38: Geometrické znázornění vlivu způsobu měření

V čase $35 \text{ s}^{1/2}$, což je přibližně ve 20 minutách, je kumulativní přírůstek hmotnosti u automatizované metody cca o 4 kg/m^2 menší než u ručních metod.

Nasycený obsah kapilární hmotnosti je přibližně stejný, ale u automatizované metody je nabyt o skoro 15 minut později. To poměrně markantně ovlivňuje sklon křivky a výsledek se proto odráží i v hodnotě výsledného absorpčního koeficientu.



Obr. 39: Detailní geometrické znázornění vlivu způsobu měření

Vzorky pro měření automatizovanou metodou byly sušeny při teplotě $105 \text{ }^\circ\text{C}$. U vzorků z CS nebyly předpokládány žádné dopady sušení za vysoké teploty, ale pro ověření bude nutné provést další sadu experimentů. Až poté bude možné rozhodnout do jaké míry je měření ovlivněno způsobem provedení, nebo teplotou sušení.

Nejistoty měření v jednotlivých laboratořích

V tabulce 6 jsou vypočítány nejistoty typu A, B a C a rozšířená nejistota pro měření CS ruční metodou v laboratoři UCEEB (CS_{L1}) a UPV (CS_{L2}).

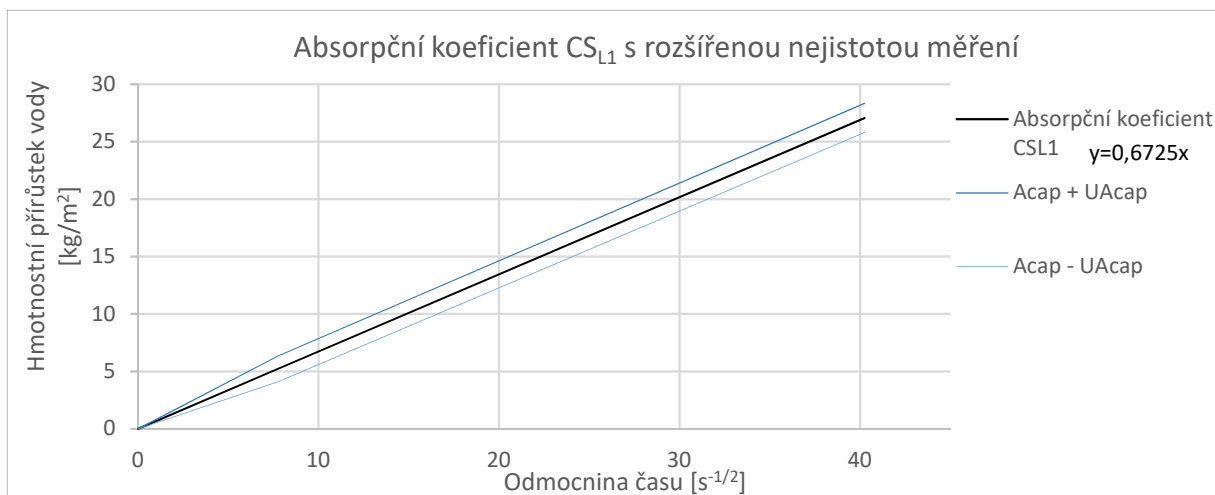
| | U_A, A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | U_B, A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | U_C, A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | U_{Acap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] |
|------------------------|---|---|---|---|
| CS_{L1} | 0,0076 | 0,0139 | 0,0158 | 0,0317 |
| CS_{L2} | 0,0055 | 0,0161 | 0,0170 | 0,0340 |

Tab. 6: Směrodatné odchylky absorpčního koeficientu typu A, B a kombinovaná a rozšířená odchylka vzorků CS

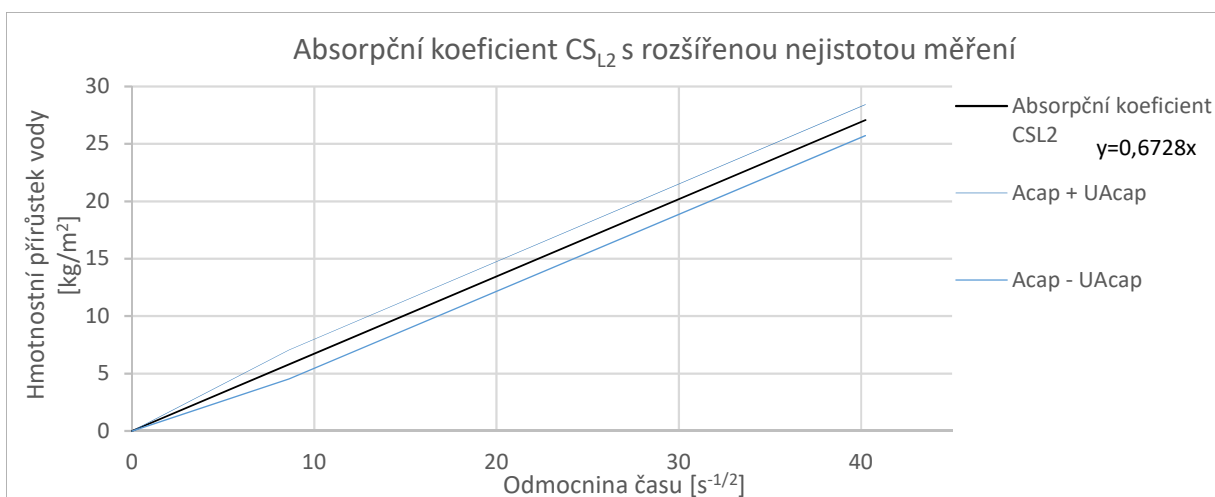
Nejistota typu A je větší v laboratoři UCEEB, protože pro výpočet a stanovení nejistoty byly měřeny pouze tři vzorky – koeficient k_x je 2,3, kdežto pro 5 vzorků je 1,4. Nejistotu typu B je v obou laboratořích poměrně velká, protože ji ovlivnil izolant bočních stran vzorků, který zmenšil efektivní plochy vzorků a ve výpočtu se objevuje v rámci nepřesnosti měření plochy provozovatelem. V laboratoři UPV navíc nebylo dosaženo stejné přesnosti měření plochy, protože nebylo k dispozici digitální posuvné měřítko a byl započítán vliv většího kolísání teploty, který ovlivnil viskozitu vody, což mohlo zpomalit pronikání vody do pórů.

Vzorky během první fáze absorpčního procesu nasákly průměrně cca 310 g vody. Rozšířená nejistota v obou laboratořích je průměrně 33 g/(m²·s^{1/2}). Při ploše vzorků 0,0121 m² je nejistota stanovení hmotnosti kumulativního přírůstku vody 16 g za čas 40 s^{1/2}, což je přibližně 5 % z celkové hmotnosti vody ve vzorku.

Aby mohly být absorpční koeficienty porovnatelné, není uvažováno posunutí na ose y, tzn. součinitel k_1 je roven 0.



Obr. 40: Grafické vyjádření průměrného absorpčního koeficientu vzorků měřených v laboratoři UCEEB s rozšířenou nejistotou měření



Obr. 41: Grafické vyjádření průměrného absorpčního koeficientu vzorků měřených v laboratoři UCEEB s rozšířenou nejistotou měření

Porovnání výsledků mezi laboratořemi

Tabulka 7 srovnává vypočítané průměrné hodnoty absorpčního koeficientu A_{cap} a nasycený obsah kapilární vlhkosti w_{cap} z měření v obou laboratořích ruční i automatizovanou metodou v této práci, průměrné výsledky z bakalářské práce (BP) a hodnoty z publikovaných článků Ch. Fenga a H. Jansseny z roků 2015 a 2018. [26] [1] [7]

| | CS_{L1} | CS_{L2} | CS_{L3} | $CS_{F-J2015}$ | $CS_{F-J2018}$ | CS_{BP} |
|---|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|-----------|
| A_{cap} [$kg/m^2 \cdot s^{1/2}$] | 0,673 | 0,673 | 0,597 | 1,06 | 1,01 | 1,256 |
| w_{cap} [kg/m^3] | 656,9 | 647,0 | 569,0 | 752,1 | 756,0 | 783,82 |

Tab. 7: Numerické porovnání výsledků vzorků CS

Z výsledků je patrné, že v laboratořích UCEEB a UPV byly ruční metodou naměřeny prakticky totožné výsledky absorpčního koeficientu. I když jsou výsledky do jisté míry nepřesné kvůli nevhodnému výběru tmelu, dokazují, že absorpční zkouška je sama o sobě nejen dobře opakovatelná, ale i reprodukovatelná. Pokud jsou experimenty prováděny za určitých, předem dostatečně stanovených pravidel, je možné dosáhnout minimální mezilaboratorní chyby. Problémem tedy je, že v normách nejsou dostatečně specifikovány podmínky měření a v laboratořích se zřejmě používají různé experimentální postupy a metody zpracování dat.

Pro další výpočty je z měření v této práci použita průměrná hodnota absorpčního koeficientu naměřeného pouze ruční metodou v obou laboratořích, tj. $A_{cap} = 0,67 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$.

Před samotným vyhodnocováním chyb reprodukovatelnosti je ověřeno, jestli jsou sady experimentálních výsledků vzájemně kompatibilní. Jsou porovnány objemové hmotnosti pro charakterizaci materiálu pomocí vyhodnocení rozdílů v jejich průměrných hodnotách prostřednictvím nezávislých T-testů. Průměrné hodnoty skupin výsledků jsou statisticky stejné, pokud je α větší než určitá úroveň (v tomto případě 0,05), jinak jsou statisticky odlišné.

Průměrné hodnoty a statistické výsledky jsou v tabulce:

| Materiálová charakteristika | CS_{DP} | $CS_{F-J2015}$ | $CS_{F-J2018}$ | CS_{BP} | α |
|-----------------------------|-----------|----------------|----------------|-----------|----------|
| ρ [kg/m^3] | 245,0 | 259,8 | 271,0 | 264,5 | 0,002 |

Tab. 8: Statistické porovnání desek kalcia-silikátu měřených v různých laboratořích

Z tabulky je vidět, že jsou objemové hmotnosti jednotlivých desek statisticky odlišné – jsou tedy použity materiály od různých výrobců. Pravděpodobně se statisticky různí i ostatní charakteristické vlastnosti a lze předpokládat větší mezilaboratorní chyby i pro absorpční koeficient. V některých počítačových modelech je ale v nabídce materiálů pouze jedna deska kalcia-silikátu, a proto výsledky mezilaboratorního porovnání, přestože jsou statisticky odlišné, poskytují velmi užitečné informace.

| | CS _{DP} | CS _{F-J2015} | CS _{F-J2018} | CS _{BP} |
|---|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Relativní odchylka $rs_{x_{i,1}k}(i)$ [%] | 1,065 | 1,649 | 1,659 | 9,749 |
| Relativní odchylka průměrů jednotlivých laboratoří $rs_{x_{i,1}k}(i, k)$ [%] | | | | |
| 27,04 | | | | |
| Průměr všech relativních rs_x všech laboratoří $\overline{rs}_{x_{i,1}k}(i, k)$ [%] | | | | |
| 3,04 | | | | |
| Mezilaboratorní chyba = chyba reprodukovatelnosti [%] | | | | |
| 26,86 | | | | |

Tab. 9: Mezilaboratorní porovnání

Největší relativní odchylka mezi vzorky jedné laboratoře byla zjištěna v případě bakalářské práce. Z toho vyplývá, že je nezbytné patřičně proškolit provozovatele. Pokud jsou experimenty prováděny bez předešlé laboratorní znalosti a zkušenosti, mohou být zatíženy velkou nepřesností. V ostatních laboratořích je při dodržování stejných podmínek a při dostatečné kontrole dosaženo malých relativních odchylek $rs_{x_{i,1}k}(i)$.

Nicméně i v případě vyřazení celého měření v rámci bakalářské práce je chyba mezi zbylými laboratořemi 24,14 %. (Protože byla zanedbána chyba opakovatelnosti, je chyba reprodukovatelnosti v tomto případě stejná.) Je tedy zřejmé, že chyba reprodukovatelnosti je mnohem větší než chyba opakovatelnosti. Je pravděpodobné, že chyba je způsobena především, protože se jedná o výrobky od různých výrobců s částečně odlišnými charakteristickými materiálovými vlastnostmi, ale v této práci to nebylo možné dokázat. Pro ověření by byla zapotřebí další sada experimentů.

Přesto chyby reprodukovatelnosti zjištěné nejen v této práci, ale i v článku Fenga a Janssena, jsou větší než obecně předpokládané chyby vlastností materiálu používané pro citlivé analýzy. Z toho vyplývá, že vstupní data pro tepelně vlhkostní analýzy byly dříve podceňovány. I proto je patrně potřeba přesněji specifikovat podmínky a požadavky na měření a důsledně proškolit provozovatele.

6.2 Přírodní vláknité materiály

V této kapitole jsou shrnuty poznatky z měření, které platí pro oba přírodní materiály. Výsledky a diskuze samostatně pro dřevovláknitý a konopí následují v dalších kapitolách.

6.2.1 Diskuze

Díky využití klíček z tahokovu byly eliminovány negativní vlivy okrajových podmínek. Oka v tahokovu zamezují vzniku kapilární spáry a použitá asfaltová izolující páska neovlivňuje strukturu měřených materiálů. Není tak zaznamenána závislost mezi velikostí vzorků a průběhem absorpčního procesu, jak je patrné z grafu 41, 47 a 50. Proto může být průměrná křivka nasákavosti vykreslena společně pro obě velikosti vzorků.

Dále je tímto vyřešen problém s izolací bočních stran netuhých vláknitých materiálů a je zajištěna stálost rozměrů v průběhu celé zkoušky. Zároveň klíčky umožňují snadné zavěšení do podvěsných vah, což se ukázalo být pro tyto materiály nezbytné.

Výsledky z měření ruční metodou nejsou použitelné, protože i při velmi opatrné manipulaci nebylo možné dosáhnout uspokojivé opakovatelnosti měření, a i mezi jednotlivými váženími, které byly prováděny v intervalu 1,5 minuty, byly zjištěny velké rozdíly. Vzorek je totiž nutné držet v dokonale vodorovné pozici, jinak voda vytéká podél vláken a při otření vzorku vlhkou houbou také nelze kontrolovat množství odebrané vody ze vzorku.

Rozdíly mezi výsledky jednotlivých vzorků v případě automatizované metody jsou pravděpodobně do jisté míry způsobeny heterogenitou materiálu. Přesto je tato metoda citlivá na manipulaci se vzorky. To ukazuje nutnost dalšího vývoje měření nejen nasákavosti těchto materiálů.

Především na počátku samotného absorpčního testu je zapotřebí zvýšené preciznosti a stejná míra ponoření vzorků, což se ukázalo na průběhu některých křivek nasákavosti. Nejpochybnější výsledky byly kvůli nadměrnému vychýlení z vyhodnocení vyřazeny podle Grubbsova testu.

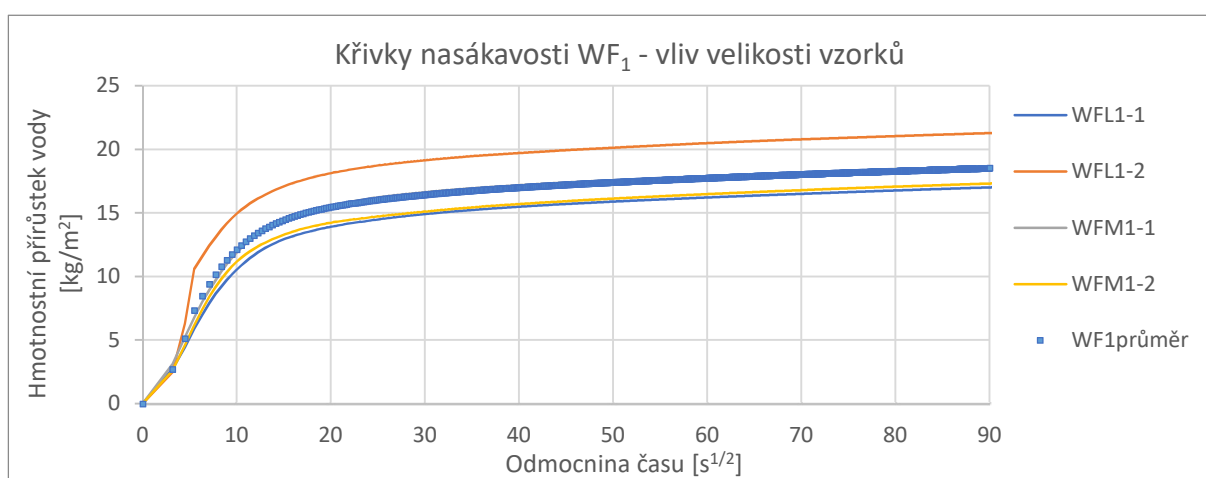
6.3 Dřevovlákn

Na vzorcích dřevovlákn byla upravována a testována navrhovaná metoda. Kromě toho byl zjišťován vliv velikosti vzorků a vliv vysoké teploty na výsledky měření.

6.3.1 Výsledky měření

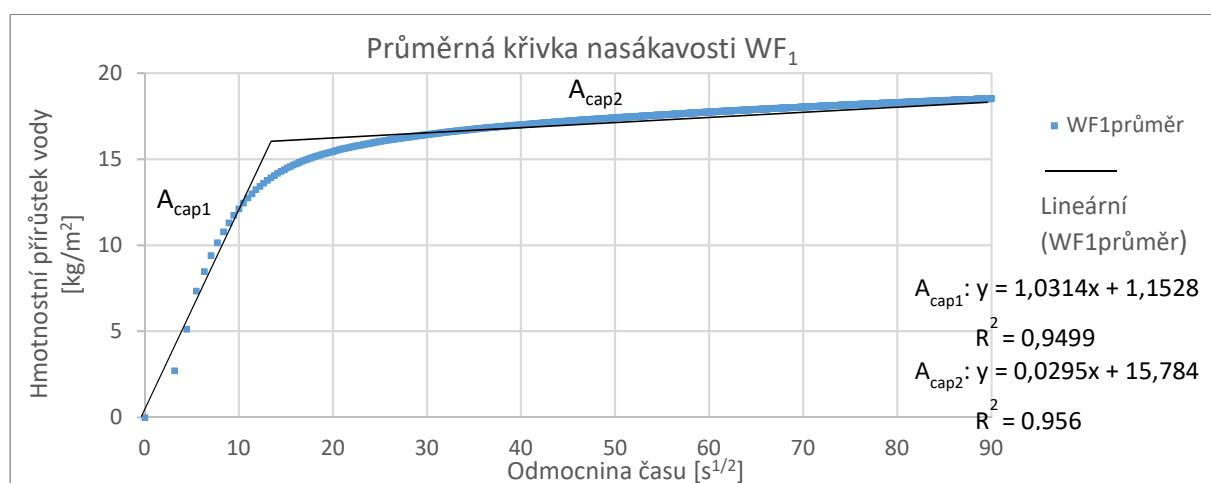
Výsledky měření nasákavosti v laboratoři UCEEB pro výpočet A_{cap}

V laboratoři UCEEB byly vzorky dřevovlákn měřeny ve dvou velikostech, a to 11x11 cm a 8x8 cm – rozlišeno písmeny L a M jako u vzorků CS. Následující graf srovnává jejich absorpční procesy a je do něj zanesena průměrná hodnota pro obě velikosti společně.



Obr. 42: Grafické porovnání různých velikostí vzorků WF měřených v laboratoři UCEEB

V grafu 43 je průměrná křivka nasákavosti WF1 rozdělena na dva průběhy absorpčního procesu, nejedná se však o 1. a 2. fázi, protože voda po celou dobu nedosáhne horního povrchu vzorků, jak je více popsáno v následující kapitole 6.3.2.



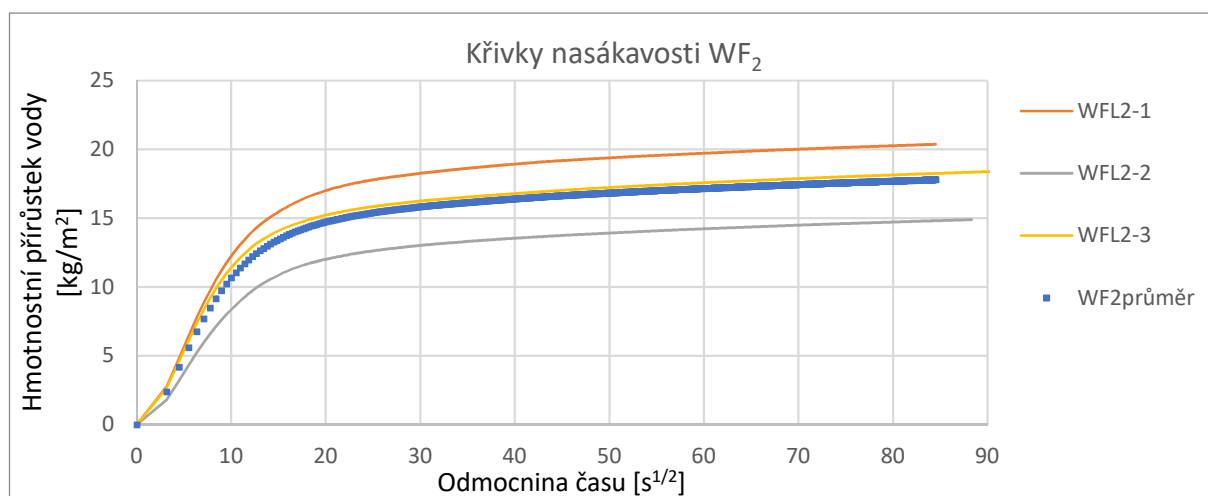
Obr. 43: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků WF měřených v laboratoři UCEEB

Výsledky měření nasákavosti v laboratoři UPV pro výpočet A_{cap}

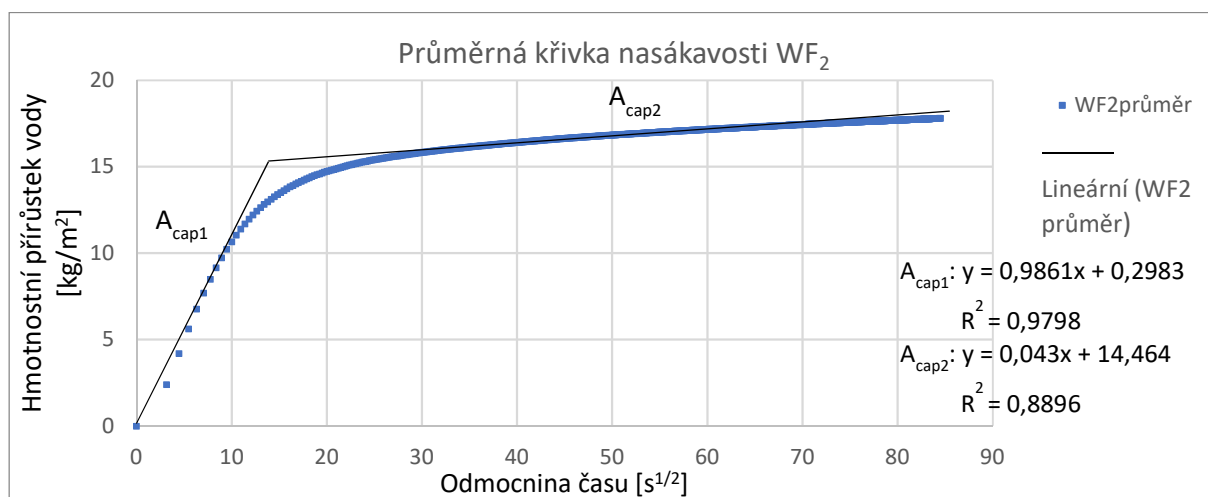
V laboratoři UPV byly měřeny tři vzorky, které byly sušeny v exikátoru s vysoušedlem při laboratorní teplotě – v grafech značeno WF_{L2-i} . Dále tři vzorky sušené při teplotě 105 °C, které po naměření byly opět vysušeny při cca 130 °C a znovu změřeny. Tyto vzorky jsou v grafech značeny trojkou (WF_{L3-i}) a pro odlišení teploty je použito značení: WF_{L3-i}_{130} .

Všechny vzorky měly původní velikost 11x11 cm.

V grafu 44 jsou srovnány vzorky sušené při laboratorní teplotě a opět jsou výsledky zprůměrovány pro výpočet absorpčního koeficientu, což je graficky znázorněno v obr 45.



Obr. 44: Grafické porovnání vzorků WF měřených v laboratoři UPV

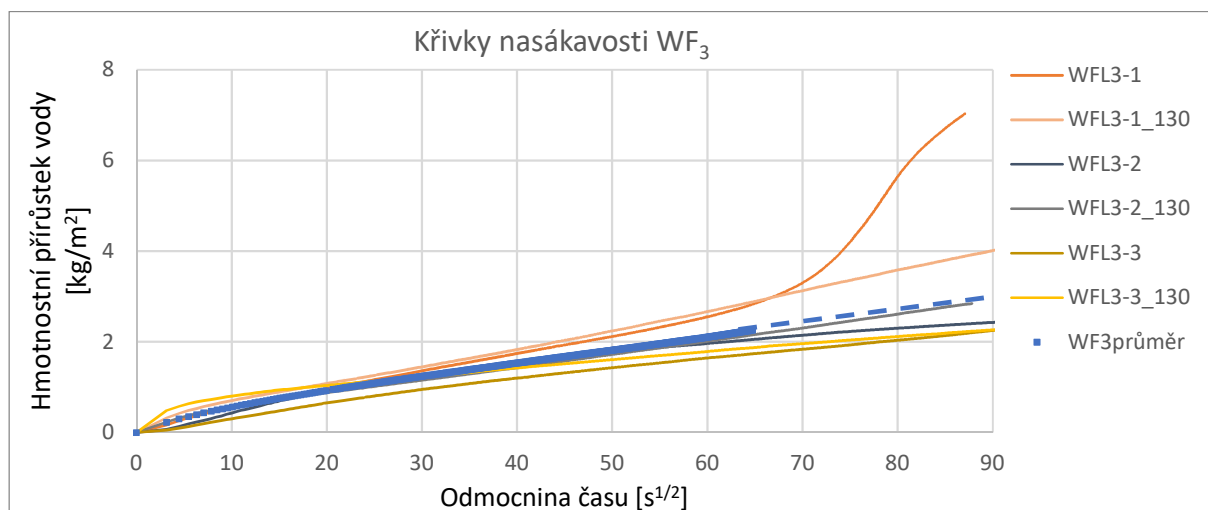


Obr. 45: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků WF měřených v laboratoři UPV

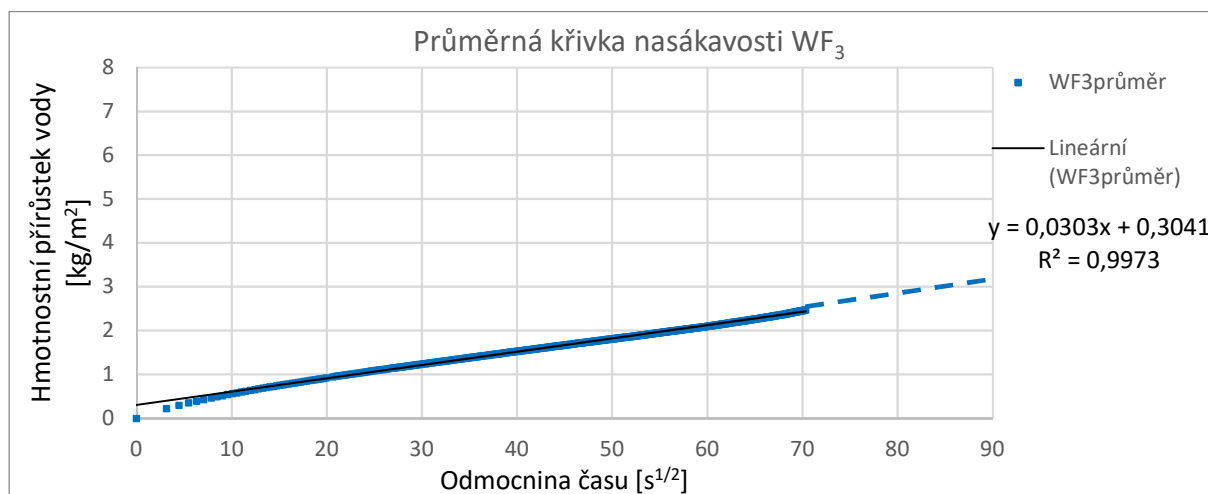
Vliv způsobu sušení WF

Vzorky sušené při 105 °C a následně při cca 130 °C jsou i s jejich průměrnou křivkou vykresleny v obr. 46. Průměrná hodnota je od 66,5 s-1/2 (tj. cca 73 minut) pouze odhadnuta. Hodnoty vzorku WFL3-1 byly od tohoto času zanedbány.

V dalším grafu 47 je znázorněna průměrná křivka pro numerické vyčíslení absorpčního koeficientu.



Obr. 46: Grafické porovnání vzorků WF sušených při teplotách 105 a 130 °C



Obr. 47: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků WF sušených při vysoké teplotě

6.3.2 Porovnání a diskuze

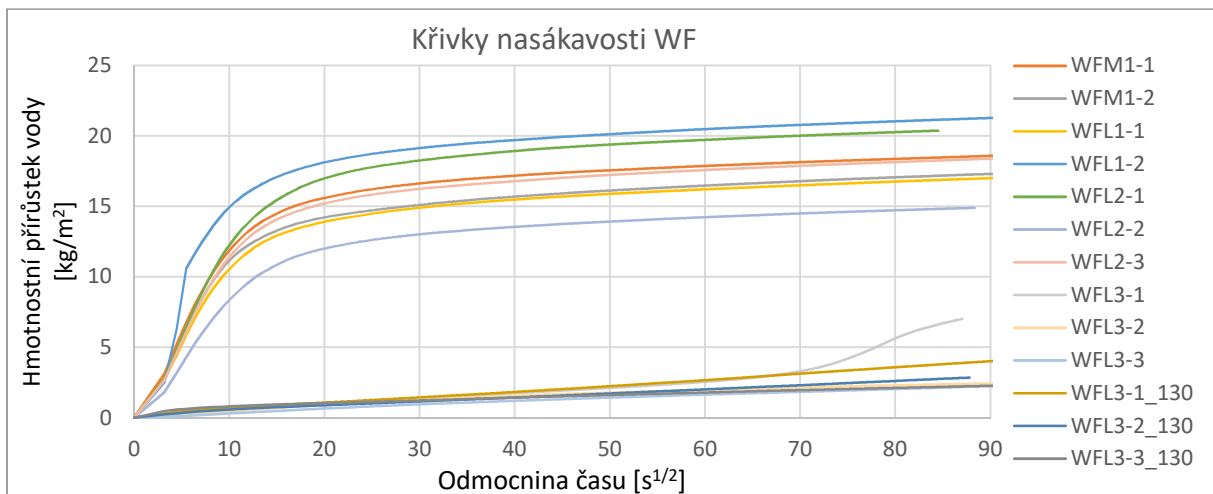
U vzorků z dřevovlákná sušeného v exikátoru s vysoušedlem za laboratorní teploty jsou zřetelně vidět dva průběhy v 1. fázi vedení kapalné vody. Jak už bylo zmíněno, nejedná se o 1. a 2. fázi absorpčního procesu jako u CS, protože voda po celou dobu nedosáhne horního

povrchu vzorků. Jde o vedení do výškové úrovně čáry ponoru a následně nad tuto úroveň. V prvních přibližně třech minutách se voda do vzorku dostává pod tlakem a velmi snadno, protože ponořená část vzorku neklade téměř žádný odpor. Během této doby vzorky nasákly průměrně 13 kg/m^2 vody, což je při ploše vzorku $0,0121 \text{ m}^2$ téměř 160 g . Jakmile jsou tlaky vyrovnány, kapilární síly vedou vodu nad úroveň ponoru a průběh je pozvolnější. Během následujících třech minut nasákly vzorky už jen 19 g vody, a během jedné hodiny byl celkový hmotnostní přírůstek 208 g . To znamená, že v prvních třech minutách vzorky nasákly 77% z celkového hmotnostního přírůstku vody po jedné hodině. Po další hodině byl hmotnostní přírůstek pouze 8 g .

Z tohoto důvodu je pro porovnatelnost jednotlivých vzorků velmi důležité, aby byly ponořeny do stejné výškové úrovně pod hladinu vody.

Vliv zvýšené teploty na vzorky dřevovláknna

Do následujícího grafu 48 byly vyneseny všechny naměřené křivky nasákavosti z obou laboratoří pro porovnání vlivu teploty při sušení. Průměrné hodnoty absorpčního koeficientu, rovnice lineární regrese a koeficienty determinace R^2 jsou vyčísleny v tabulce 10. V případě WF_1 a WF_2 jsou vyčísleny hodnoty obou průběhů 1. fáze absorpčního procesu. Pro měření WF_3 je stanovena jen hodnota A_{cap1} , protože průběh této křivky nasákavosti může být proložen pouze jednou tangentou. To je ověřeno koeficientem spolehlivosti, který je v tomto případě $R^2 = 0,9973$.



Obr. 48: Grafické porovnání všech vzorků WF při různém způsobu sušení

| Označení | Průběh | A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | R ² [-] |
|-----------------|---------------------|---|-----------------------|
| WF ₁ | A _{cap1-1} | 1,0314 | 0,9499 |
| | A _{cap1-2} | 0,0295 | 0,956 |
| WF ₂ | A _{cap2-1} | 0,9861 | 0,9798 |
| | A _{cap2-2} | 0,043 | 0,8896 |
| WF ₃ | A _{cap3-1} | 0,0303 | 0,9973 |

Tab. 10: Průměrné absorpční koeficienty vzorků WF z obou laboratoří

Z grafu i z hodnot absorpčního koeficientu je zřejmý markantní rozdíl nasákavosti vzorků sušených při laboratorní teplotě a sušených v sušárně při vysoké teplotě.

Po vzoru tepelné modifikace dřeva, byly dřevovláknité vzorky vystaveny zvýšené teplotě po dobu přibližně 3. týdnů. Při procesu tepelné modifikace probíhá ve dřevě značné množství chemických procesů, které mění částečně jeho mechanické, ale především fyzikální vlastnosti.

Vedle jiných procesů dochází také k výraznému poklesu počtu sorpčních míst na –OH skupinách, tzn. snižuje se schopnost dřeva absorbovat vodu, což také velmi příznivě ovlivňuje rozměrovou stálost a rovnovážnou vlhkost dřeva. [27] [28]

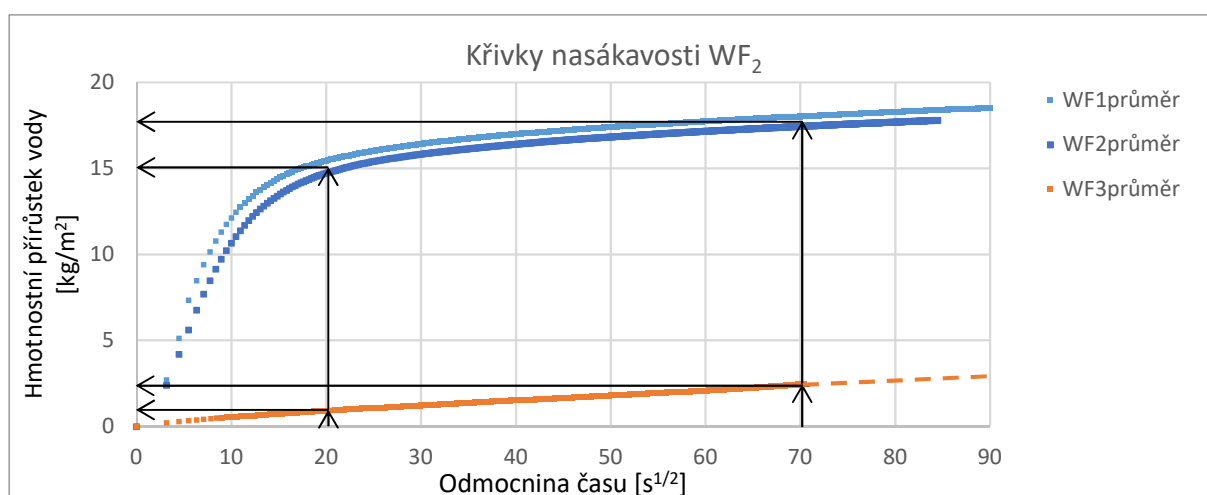
Je nutné zmínit, že tepelná modifikace dřeva obvykle probíhá ve 3. fázích v kratších časových intervalech v řádu hodin až několik dní a za vyšší teploty, než tomu bylo v případě vzorků měřených v této práci. Proto nelze určit, jestli je snížení nasákavosti způsobeno působením vysoké teploty na rozštěpená dřevní vlákna, nebo na ostatní složky, které se konkrétně do desek STEICOflex přidávají. Jedná se o polyolefinová vlákna, která mají velmi nízkou teplotu tání 107-168 °C a fosforečnan amonný, který se do desek přidává kvůli protipožární ochraně. [29] Bylo by zapotřebí mikroskopického nebo chemického rozboru před a po působení zvýšené teploty, aby bylo možné odhadnout, co se ve struktuře skutečně odehrává.

Ale je evidentní, že je působením vysoké teploty struktura více uzavřena. To lze vyčíst z absorpčního koeficient A_{cap3-1} , který je průměrně stejný, jako $A_{cap\ i-2}$ u měření WF₁ a WF₂. To znamená, že oproti běžným vzorkům modifikovaný materiál klade odpor proti vniknutí vody i do výšky ponoru.

Vzorky během sušení změny také svou barvu a rozměry, viz fotografie z měření (obr. 49). Rozměry byly přeměřeny a hmotnostní přírůstky vody byly vztaženy na aktuální plochu vzorku v kontaktu s vodou.



Obr. 49: Vzorky dřevovlákná před a po sušení za vysoké teploty



Obr. 50: Grafické porovnání vlivu teploty sušení vzorků WF na nasákavost

V čase $20 \text{ s}^{1/2}$, což odpovídá skoro sedmi minutám, je rozdíl nasákavosti zhruba 14 kg/m^2 . Po téměř hodině a půl dosahuje rozdíl nasákavostí přibližně 15 kg/m^2 . Každý vzorek z měření WF₁ a WF₂ nasákl za tuto dobu přibližně 210 g vody, kdežto v případě měření WF₃ pouze cca 30 g vody, což odpovídá $14,3 \%$ z nasákavosti běžných vzorků.

Navíc je u vzorků sušených při vysoké teplotě dosaženo mnohem menších rozdílů mezi jednotlivými vzorky, což potvrzuje, že odchylky u běžných vzorků dřevovlákná jsou způsobené nehomogenitou materiálu.

Vzhledem k naměřeným hodnotám a nedostatku materiálů k této problematice, by bylo přínosné naměřit další sady experimentů při různých teplotách a další zkoušky pro zjištění vlivu na např. tepelněizolační a akustické vlastnosti takto modifikovaného materiálu.

Pokud by byly zjištěny stejné nebo lepší hodnoty i ostatních vlastností, mohly by mít dřevovláknité tepelněizolační desky modifikované vysokou teplotou potenciál inovativního materiálu.

6.4 Konopí

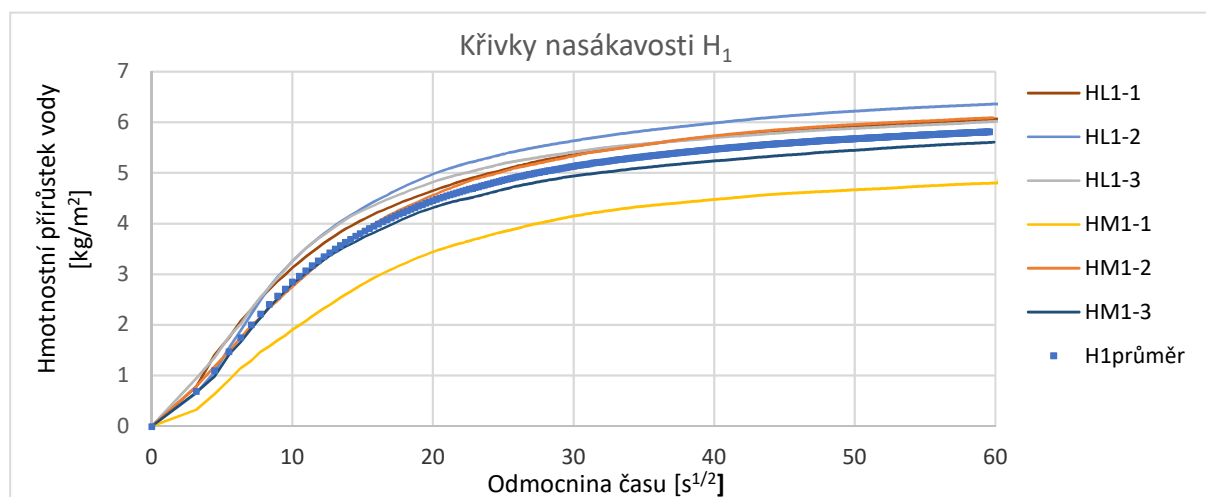
Na vzorcích z konopí byl stejně jako u dřevovláknitých desek zjišťován vliv velikosti vzorků a vliv vysoké teploty při sušení vzorků a byla vyvíjena navrhovaná metoda měření nasákavosti vláknitých materiálů.

Absorpční testy byly prováděny za stejných podmínek jako u vzorků z dřevovláknů. V laboratoři UCEEB byla nasákavost měřena na dvou velikostech 11x11 a 8x8 cm a v laboratoři UPV pro dva způsoby sušení.

6.4.1 Výsledky měření

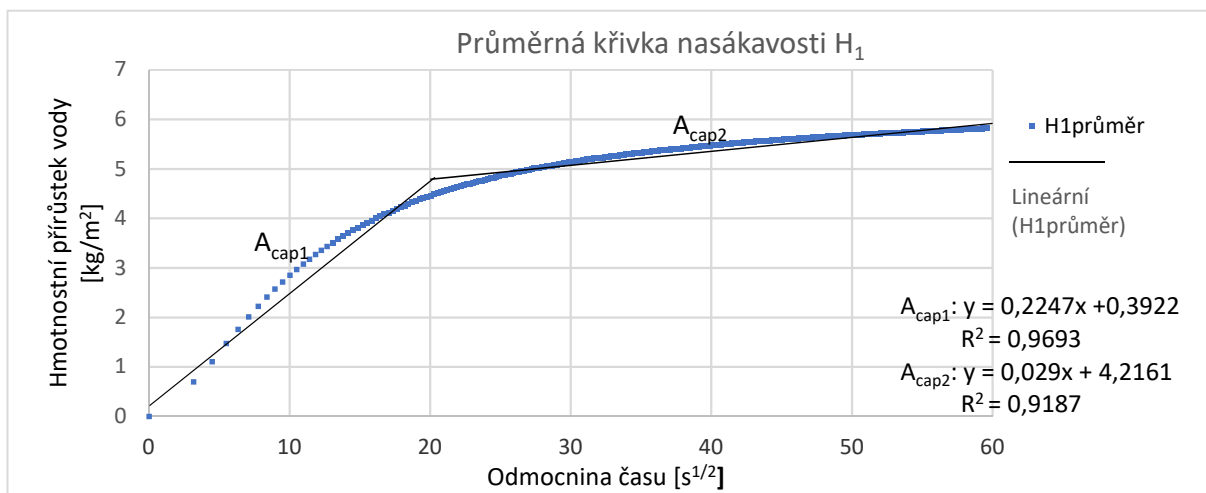
Výsledky jsou zpracovány také obdobně. Některé vzorky musely být pro velké vychýlení zanedbány a nejsou zahrnuty do grafů.

Výsledky měření nasákavosti v laboratoři UCEEB pro výpočet A_{cap}



Obr. 51: Grafické porovnání různých velikostí vzorků H měřených v laboratoři UCEEB

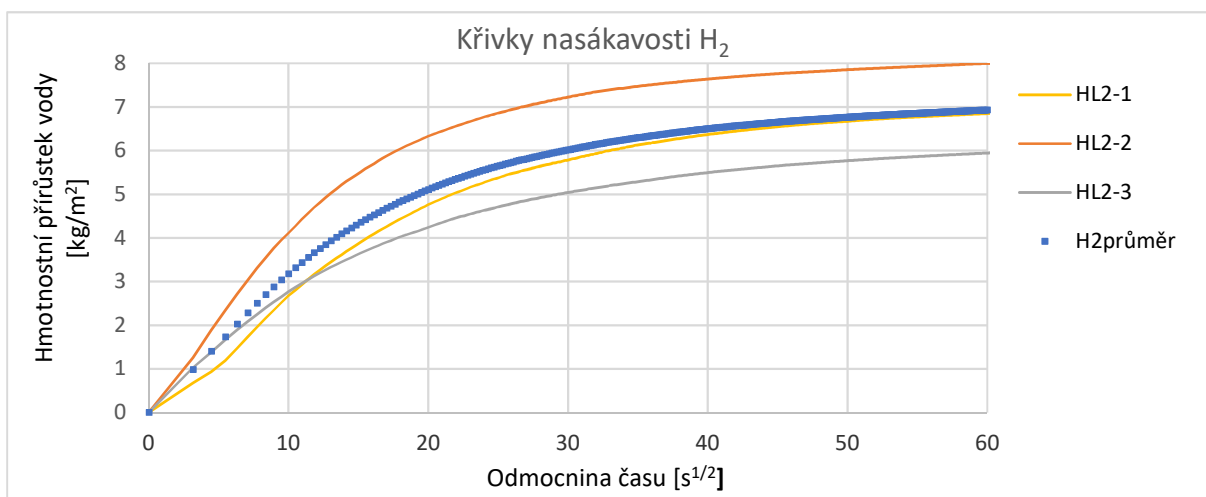
V grafu 52 je průměrná křivka nasákavosti H_1 opět rozdělena na dva průběhy absorpčního procesu.



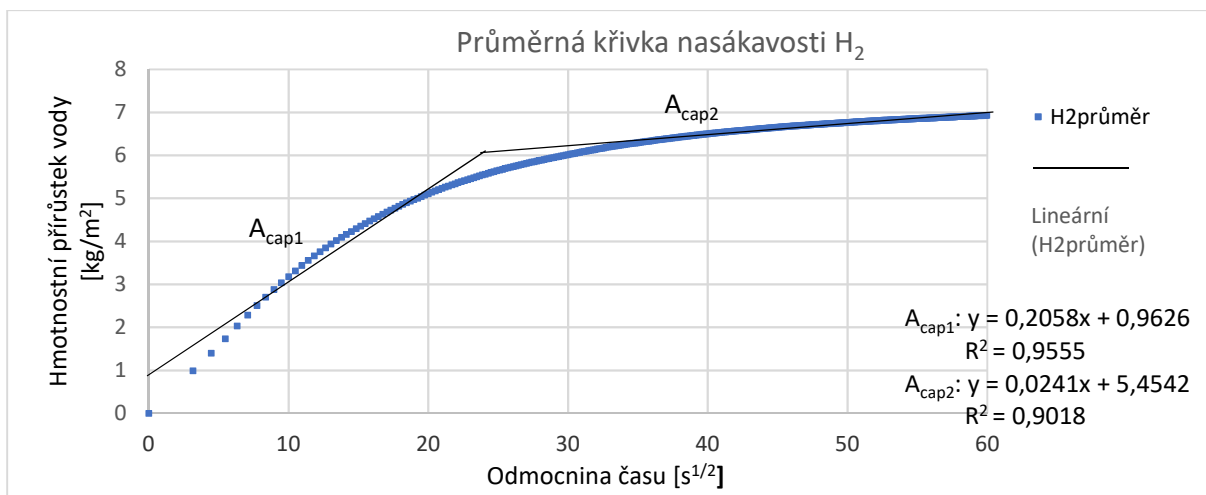
Obr. 52: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků H měřených v laboratoři UCEEB

Výsledky měření nasákavosti v laboratoři UPV pro výpočet A_{cap}

V laboratoři UPV byly měřeny tři vzorky, které byly sušeny v exikátoru s vysoušedlem při laboratorní teplotě a pět vzorků sušených při teplotě 105 °C, všechny o velikosti kontaktní plochy 11x11 cm.



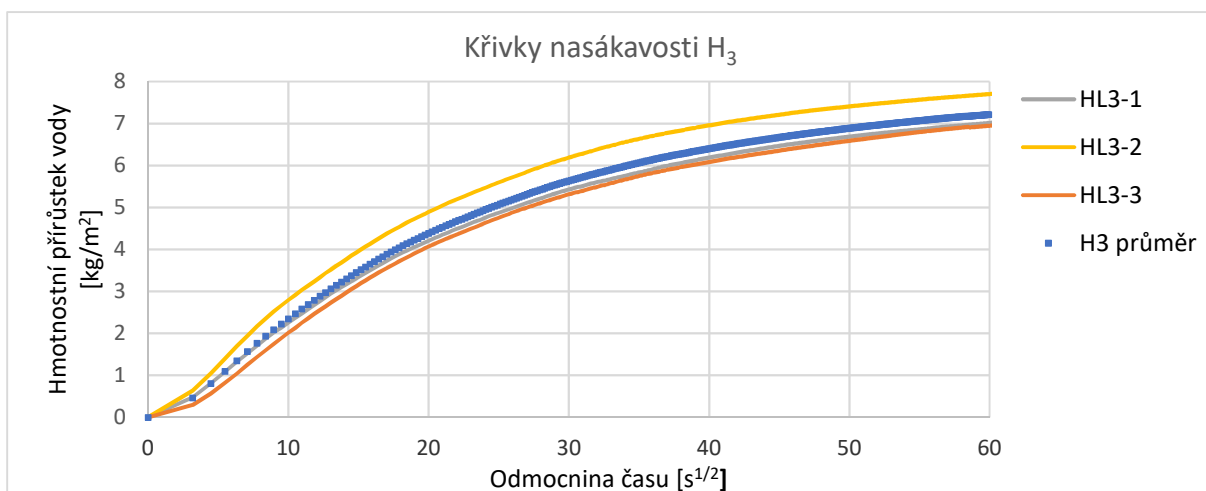
Obr. 53: Grafické porovnání vzorků H měřených v laboratoři UPV



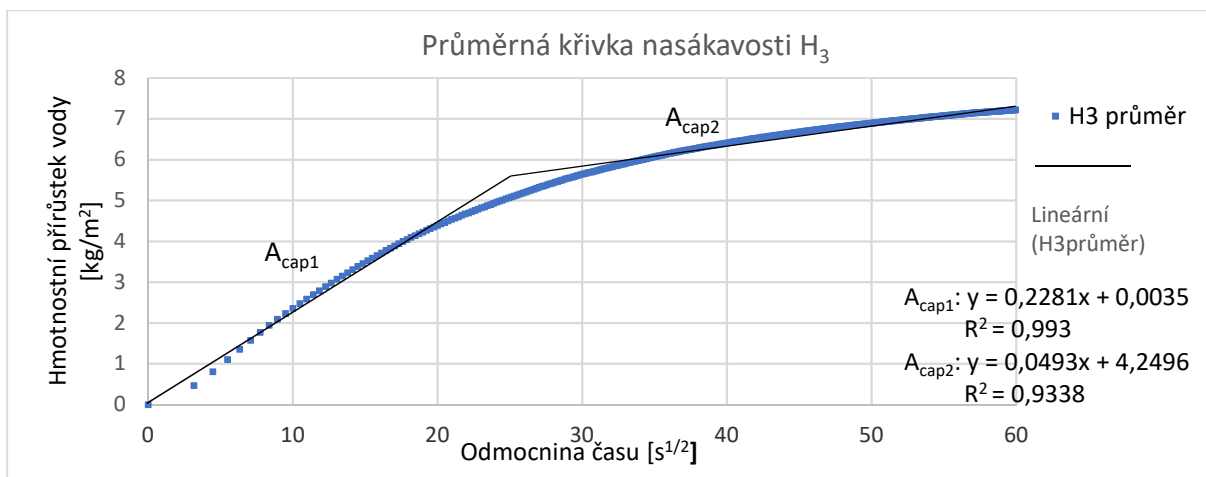
Obr. 54: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků H měřených v laboratoři UPV

Vliv způsobu sušení H

Vzorky sušené v sušárně jsou vykresleny v obr. 55 s průměrnou křivkou nasákavosti, která je v dalším grafu (obr. 56) znázorněna pro výpočet absorpčního koeficientu.



Obr. 55: Grafické porovnání vzorků H sušených při teplotě 105 °C



Obr. 56: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků H sušených při vysoké teplotě

6.4.2 Porovnání a diskuze

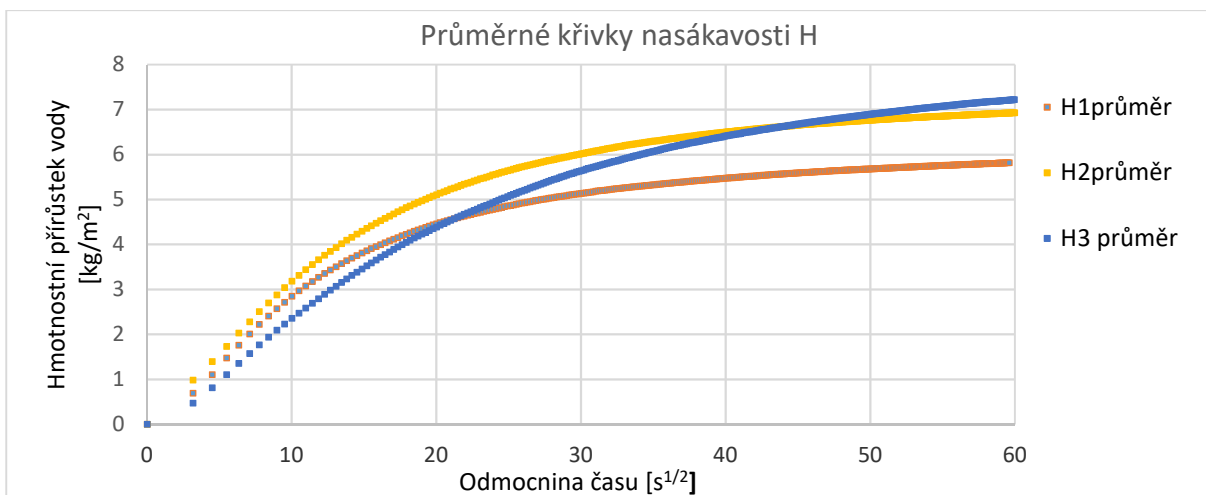
Vzorky z konopí sušené za laboratorní teploty kladou oproti dřevoláknu větší odpor vůči vniknutí vody a není tolik patrný přechod mezi nasáknutím vody do úrovně čáry ponoru a nad její úroveň. Není tedy možné stanovit čas, kdy se voda do vzorků dostává pod tlakem, a kdy začínají převládat kapilární síly.

Nicméně aby mohly být oba přírodní materiály numericky srovnány, byl absorpční proces konopí také rozdělen na dva průběhy A_{cap1} a A_{cap2} . Tečny obou průběhů se protínají až po 7-10 minutách.

Během první hodiny vzorky nasály průměrně $6,7 \text{ kg/m}^2$ vody, což vztaženo na plochu vzorku $0,0121 \text{ m}^2$ je přibližně 80,5 g. Oproti hmotnostnímu přírůstku vzorků z dřevolákna je to pouze 38,7 %. Navíc jsou mezi průběhy křivek nasákavosti konopných vzorků menší rozdíly. Další porovnání mezi materiály je popsáno v kapitole 6.5.

Vliv zvýšené teploty na vzorky konopí

Do následujícího grafu 57 byly vyneseny všechny průměrné křivky nasákavosti z obou laboratoří pro porovnání vlivu způsobu sušení. Jak je vidět z průběhů křivek, nejsou zaznamenány značné rozdíly, které by dokazovaly vliv teploty při sušení vzorků z konopí. Z toho lze předpokládat, že zvýšená teplota do $105 \text{ }^\circ\text{C}$ nemá vliv na strukturu materiálu



Obr. 57: Grafické porovnání průměrných křivek nasákavosti H

V tabulce 11 jsou průměrné absorpční koeficienty, jejich rovnice lineární regrese a koeficient determinace R^2 .

| Označení | Průběh | A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | R^2 [-] |
|----------------|-------------------|---|--------------|
| H ₁ | Acap ₁ | 0,2247 | 0,9693 |
| | Acap ₂ | 0,029 | 0,9187 |
| H ₂ | Acap ₁ | 0,2058 | 0,9555 |
| | Acap ₂ | 0,0241 | 0,9018 |
| H ₃ | Acap ₁ | 0,2281 | 0,993 |
| | Acap ₂ | 0,0493 | 0,9338 |

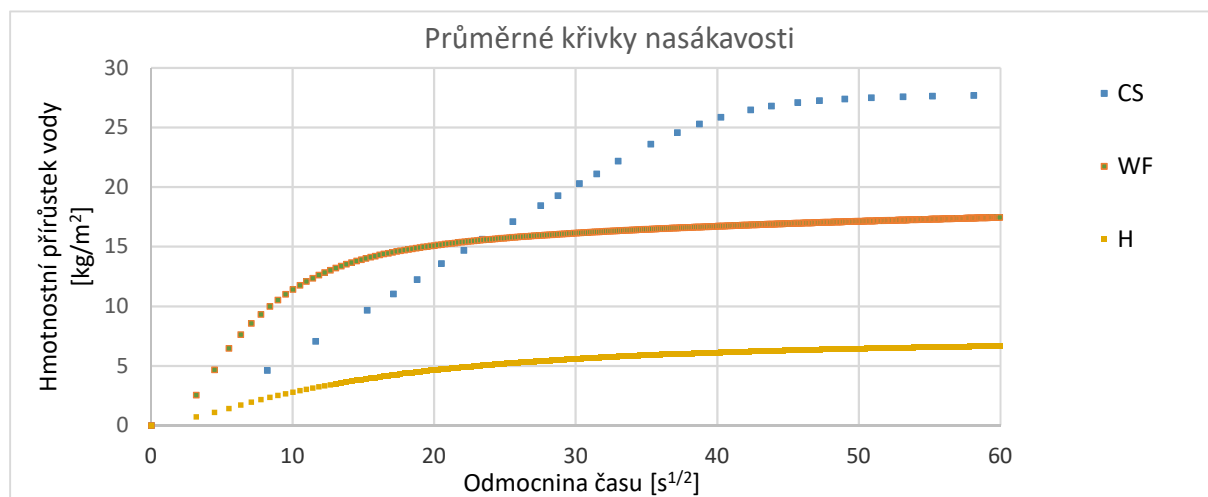
Tab. 11: Průměrné absorpční koeficienty vzorků H z obou laboratoří

6.5 Shrnutí výsledků A_{cap} a porovnání měřených materiálů

Graf 58 porovnává průměrné křivky jednotlivých materiálů. Do tabulky 12 byly shrnuty jejich naměřené absorpční koeficienty, které jsou graficky znázorněny v grafu 59. Oba grafy zachycují vzorky CS měřené pouze ruční metodou a vzorky WF sušené při laboratorní teplotě. Porovnání vlivu zvýšené teploty při sušení WF bylo provedeno v rámci kapitoly 6.3.2.

Pro měření stejným způsobem, pouze v jiné laboratoři, byly hodnoty zprůměrovány a jsou značeny pouze zkratkou pro daný materiál. V případě konopí nebyly zjištěny rozdíly mezi vzorky sušenými při různé teplotě, proto je v tabulce průměr hodnot společný pro oba způsoby sušení.

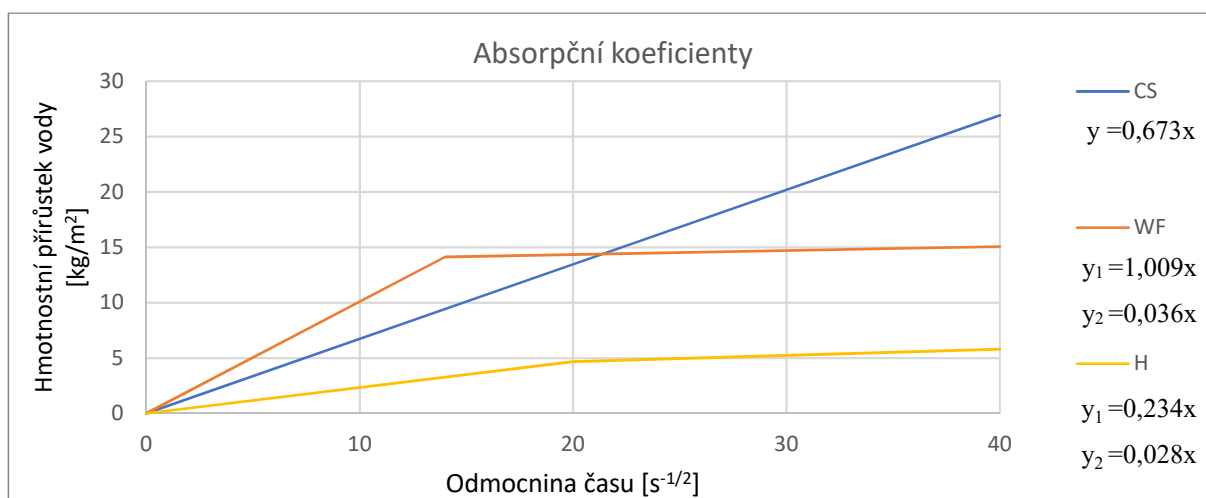
U materiálů, u kterých byly naměřeny dva průběhy 1. fáze absorpčního procesu, jsou v tabulce sloupce rozděleny na dvě kolonky – jedná se o WF a H.



Obr. 58: Grafické porovnání křivek nasákavosti měřených materiálů

| | CS | CS _{L3} | WF | WF _{L3} | H | | |
|---|-------|------------------|-------|------------------|-------|-------|-------|
| A_{cap} [kg/m ² ·s ^{1/2}] | 0,673 | 0,597 | 1,009 | 0,036 | 0,030 | 0,234 | 0,028 |

Tab. 12: Průměrné absorpční koeficienty měřených materiálů



Obr. 59: Grafické porovnání absorpčního koeficientu měřených materiálů

Z hodnot v tabulce a z grafického porovnání je patrné, že nasákavost je v počátku experimentu největší pro dřevovláknó. Absorpční koeficient je 4,3x větší než v případě vzorků z konopí. Po vyrovnání tlaků, ke kterému v tomto případě dochází přibližně po třech minutách, se nasákavost rapidně sníží a je téměř srovnatelná se vzorky z konopí. Ve chvíli, kdy u všech materiálů začínají převládat kapilární síly, nasákává nejrychleji kalcium-silikát, u něhož díky jeho homogenitě je průběh lineární až do dosažení w_{cap} , poté nastává 2. fáze absorpčního procesu až do plného nasycení.

Doba, za kterou materiály dosáhnou 2. fáze a plného nasycení je závislá na tloušťce materiálu (respektive výšce vzorku), což je dobře patrné v kapitole 7.3.

Na rozdíl od kalcia-silikátu nejsou přírodní materiály částečným ponořením v průběhu zkoušky zcela nasyceny. Byl proto u těchto materiálů proveden doplňkový experiment nasákavosti úplným ponořením (viz kapitola 3.2.2) pro zjištění hodnoty obsahu vlhkosti zcela nasyceného vzorku w_{sat} . Měření bylo provedeno automatizovanou metodou a byl sledován nárůst hmotnosti v čase, tudíž bylo možné stanovit i nasycený obsah kapilární vlhkosti.

Z hodnot absorpčního koeficientu a nasyceného obsahu kapilární vlhkosti byl pro všechny materiály dopočítán součinitel vlhkostní vodivosti podle vzorce (2.3-6):

$$\kappa = D_w \approx \left(\frac{A_{cap}}{w_{cap}} \right)^2 \text{ [m}^2\text{/s]}. \text{ Výsledky jsou porovnány v tabulce 13.}$$

| | CS | CS _{L3} | WF | | H | |
|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| κ [m ² /s] | 1,065·10 ⁻⁶ | 1,114·10 ⁻⁶ | 1,091·10 ⁻⁵ | 1,389·10 ⁻⁸ | 1,478·10 ⁻⁶ | 2,117·10 ⁻⁸ |

Tab. 13: Součinitel vlhkostní vodivosti měřených materiálů

Výsledky součinitele vlhkostní vodivosti potvrzují výše popsané a mimo jiné také vhodnost kalcium-silikátových desek pro využití jako vnitřní tepelné izolace, což je dokázané i v následující kapitole praktického využití výsledků.

Zbylé dva materiály jsou i podle výsledků a ostatních vlastností velmi vhodné pro zateplení z vnější strany.

7 Praktické využití výsledků měření CS

Z výsledků mezilaboratorního porovnání měření nasákavosti vyplývá, že v různých laboratořích jsou velké rozdíly v laboratorních postupech, manipulaci se vzorky a v následném zpracování dat. Chyby reprodukovatelnosti kalcium-silikátových desek zjištěné v této práci jsou 27 %. Pro účely této kapitoly je zaveden předpoklad, že mají všechny porovnávané desky totožné vlastnosti, které byly chybně naměřeny. Cílem je zjistit, jaký dopad má zadávání nepřesných dat pro tepelně vlhkostní analýzy a ověřit tak důležitost přesnější specifikace podmínek a požadavků na měření.

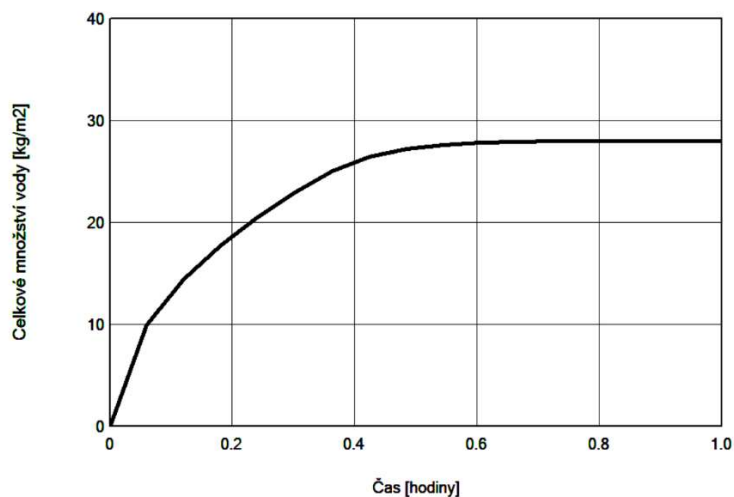
7.1 Simulace absorpčního testu

V softwaru WUFI Pro 6.2. byly nejdříve nasimulovány podmínky absorpčního testu pro ověření správnosti zadávání dat. Program WUFI umožňuje realistický výpočet dynamického chování tepla a vlhkosti ve vícevrstvových stavebních konstrukcích vystavených vnějším přírodním podmínkám. Vlhkostní transport program vypočítává na základě parciální diferenciální rovnice 2.3-7: $\frac{\partial w}{\partial t} = D_w \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$.

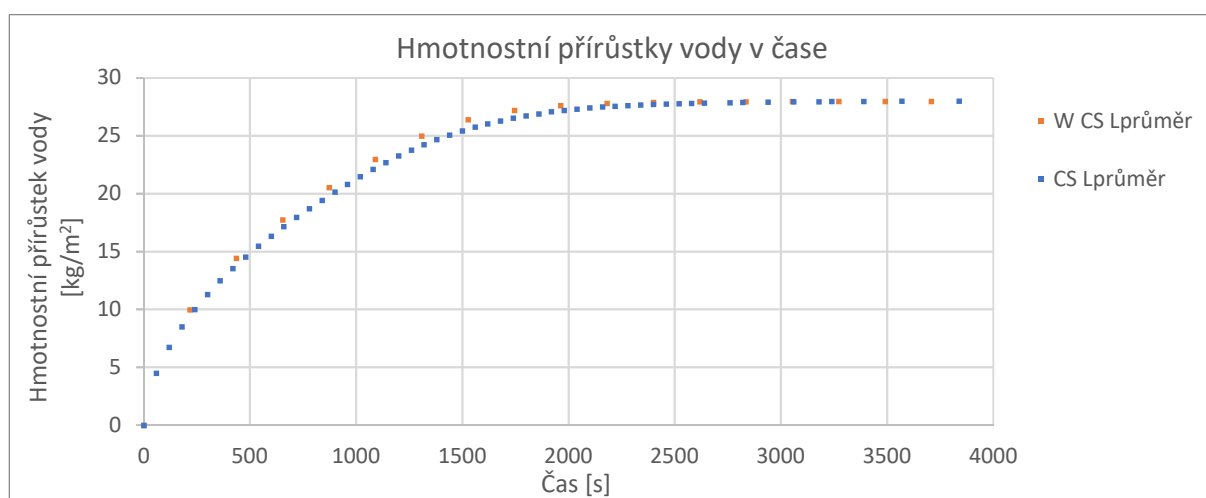
Součinitel vlhkostní vodivosti je zadáván v závislosti na obsahu vlhkosti konkrétních materiálů. Výpočet koeficientu vlhkostní vodivosti pro sání D_{ws} je v programu WUFI proveden podle přibližného vztahu:

$$D_{ws} = 3,8 \cdot \left(\frac{A_{cap}}{w_{cap}}\right)^2 \cdot 1000 \left(\frac{w}{w_{ca}} - 1\right) \quad [\text{m}^2/\text{s}], \quad (7.1-1)$$

Výsledek vlhkostního průběhu počítačové simulace je na obr. 60 v $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{hod})$. Hodnoty naměřené průměrné křivky nasákavosti CS proto byly převedeny na stejné jednotky, aby bylo možné průběhy experimentu a počítačového modelu graficky porovnat, viz graf 61. Výsledky získané z programu WUFI jsou v následujících grafech označené písmenem W.



Obr. 60: Výsledky počítačové simulace absorpčního testu CS [WUFI Pro 6.2]



Obr. 61: Grafické porovnání experimentu nasákavosti a modelu v programu WUFI Pro 6.2

7.2 Vliv okrajových a počátečních podmínek

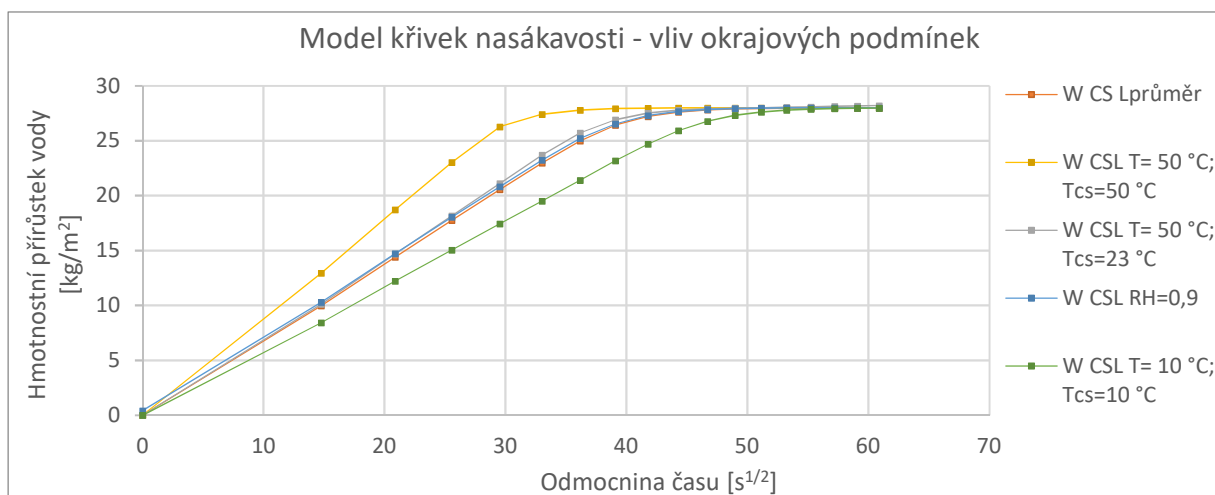
Po ověření, že jsou výsledky kompatibilní, byl zjišťován vliv okrajové teploty (T), teploty vzorků (T_{cs}) a počáteční relativní vlhkosti vzorků (RH), viz graf 62.

Podle simulací nemá změna teploty prostředí a počáteční relativní vlhkost vzorků téměř žádný vliv, přestože jsou uvažovány velmi rozdílné hodnoty.

Vzorky byly před samotnou zkouškou nasákavosti plně vysušeny, proto byla v simulaci zadána nulová hodnota. Poté byla zjištění vlivu zadána hodnota $RH = 0,9$ [-].

V případě teploty byla uvažována laboratorní teplota $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, která byla poté změněna na teplotu $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Simulace ale pravděpodobně nezohledňuje změnu teploty vody. Změnou teploty vody se mění její viskozita, což může zpomalit pronikání vody do struktury pórů.

Změna průběhu křivky nasákavosti je patrná až v případě změny počáteční teploty vzorku. Zvýšením teploty se zvýšila i hodnota absorpčního koeficientu, což se v grafu projevilo větším sklonem a naopak, při nižší teplotě je sklon křivky menší.

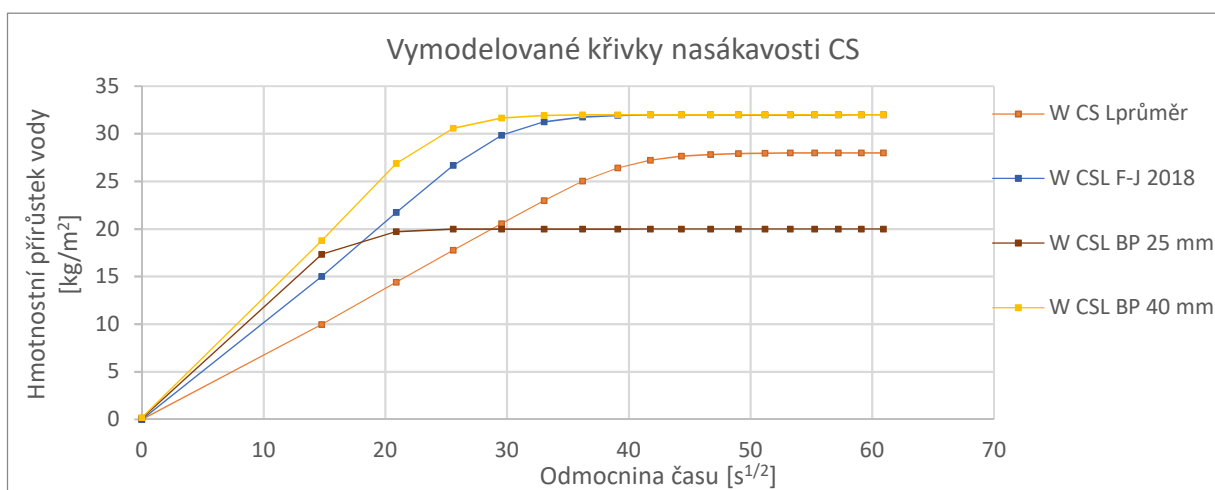


Obr. 62: Zjišťování vlivu teploty a relativní vlhkosti na průběh křivek nasákavosti v programu WUFI Pro 6.2

7.3 Porovnání modelů křivek nasákavosti CS z mezilaboratorního porovnání

Dále byl vymodelován předpokládaný průběh křivky nasákavosti CS podle údajů z článku Fenga a Jansseny z roku 2018 při výšce vzorků 40 mm a průběh křivky nasákavosti z bakalářské práce. [7] [26] Namodelovaná křivka W CSL BP byla také porovnána s naměřenými daty a opět byla zjištěna téměř úplná shoda. Vzorky z bakalářské práce měly výšku 25 mm, což ovlivňuje polohu „cross pointu“ a průběh křivky nasákavosti, ne však hodnotu absorpčního koeficientu A_{cap} nebo nasyceného obsahu kapilární vlhkosti w_{cap} . Pro lepší srovnání byl namodelován průběh absorpčního procesu pro výšku vzorků 40 mm.

Z průběhů je dobře vidět rozdílnost naměřených dat.

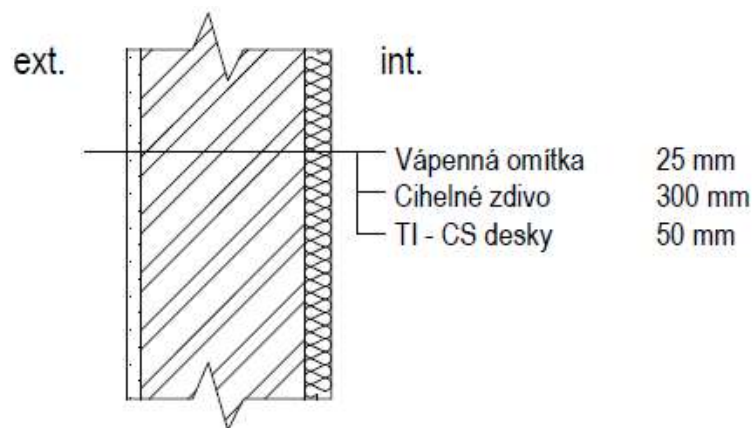


Obr. 63: Grafické porovnání křivek nasákavosti z programu WUFI Pro 6.2

7.4 Použití dat v modelové konstrukci

Pro posouzení vlivu těchto zjištěných rozdílů na tepelně vlhkostní chování konstrukce byly porovnávány kalcium-silikátové desky použity ve skladbě konstrukce stěny historického domu jako vnitřní izolace. Pro principiální srovnání byla konstrukce zjednodušena, jak je vidět na obr. 64.

Pro účely této simulace byla nosná konstrukce a tepelná izolace rozdělena na 5 identických vrstev, aby bylo z výsledků patrné množství vody v jednotlivých částech konstrukce.



Obr. 64: Zjednodušená skladba konstrukce historického domu

Tepelný odpor byl zadán pro vnější povrch $0,059 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ a pro vnitřní povrch standardně $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Sluneční záření bylo vyjádřeno absorpcí krátkovlnného záření 0,4, což je hodnota pro běžné světlé povrchy. Vyzařování dlouhovlnného záření je již zahrnuto v tepelném odporu vnějšího povrchu. Odrazivost okolního terénu byla uvažována běžná hodnota 0,2. Na površích nebyly zadány žádné difúzně nepropustné vrstvy, proto nebyly vyplněny Sd-hodnoty.

Pro uvažování nejnepříznivějších dešťových podmínek byl faktor vystavení dešti FE zadán 1,5 a faktor zachycení deště $FD = 1$ a nebyly ve výpočtu zatížení deštěm redukovány. Navíc byla konstrukce orientována na severozápad, kde je podle analýzy klimatu nejvíce zatížena kombinací množství srážek a ochlazování povrchu, viz obr. 66.

Vnější klimatické hodnoty byly uvažovány pro Hradec Králové ($50,22^\circ$ severní šířky; $15,79^\circ$ východní délky, 230 m n. m.). Klimatické údaje o vnějším povrchu byly získány na základě Českého hydrometeorologického ústavu z databáze softwaru WUFI Pro 6.2.

Vnitřní podmínky byly zjednodušeny – byla uvažována konstantní teplota 21°C a relativní vlhkost 60 %.

Výpočetní interval byl stanoven na 4 roky, aby bylo patrné, jestli vlhkost v konstrukci v průběhu let stoupá.

Vnější povrch (levá strana)

Tepelný odpor [(m² K)/W] Definuje uživatel

zahmuje částí dlouhovlnného záření [W/(m² K)]

závisí na větru ...

Sd-hodnota [m] Bez povrchu

Pozn. Toto nastavení neovlivňuje absorpci srážek

Absorpce krátkovlnného záření [-] Štuk, běžně světlý

Vyzařování dlouhovlnného záření [-]

Bilance záření ... Poznámka: Zahnutí ochlazování povrchů ovlivněné emisivitou povrchu konstrukce. Některé zvláštní případy mohou vyžadovat, aby klimatický soubor obsahoval přesná data atmosférického zpětného vyzařování.

Krátkovlnná odrazivost okolního terénu [-] Běžná hodnota

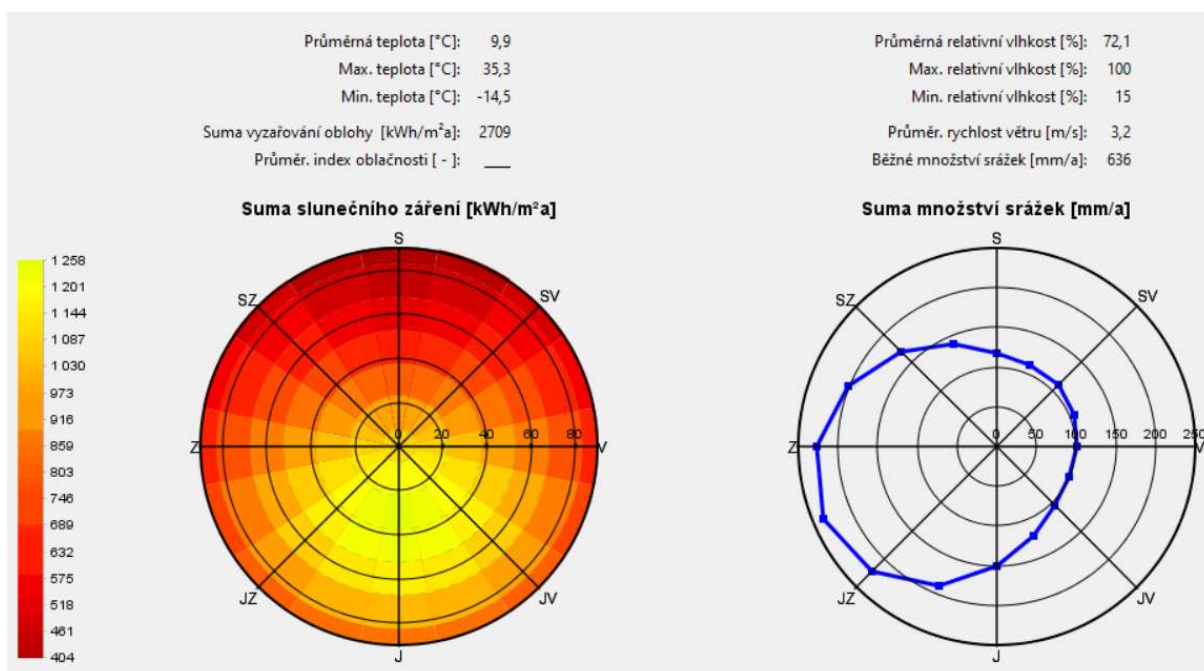
Faktor redukce dešťové vody [-] Definuje uživatel

Vnitřní povrch (pravá strana)

Tepelný odpor [(m² K)/W] (Definuje uživatel)

Sd-hodnota [m] Bez povrchu

Obr. 65: Přestupové součinitele povrchů [WUFI® Pro 6.2]

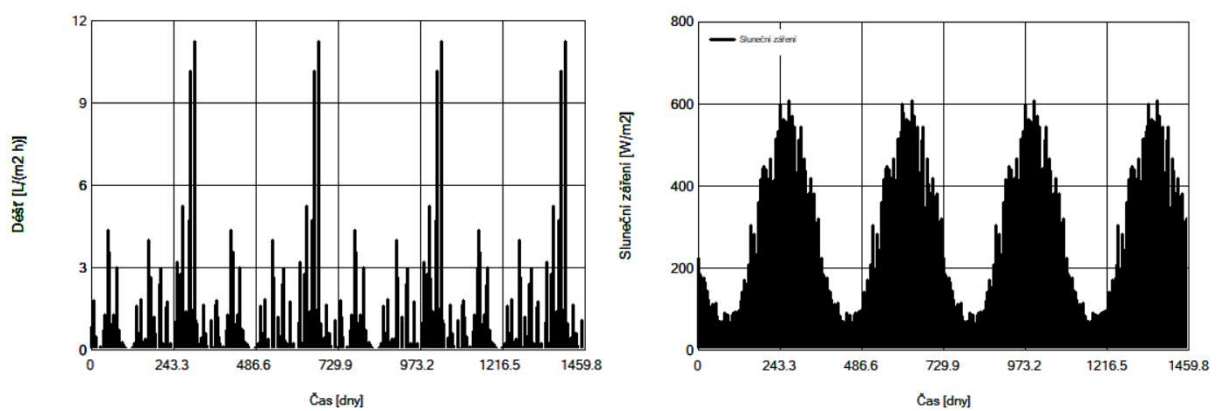


Obr. 66: Sluneční záření a množství srážek působící na konstrukci [WUFI® Pro 6.2]

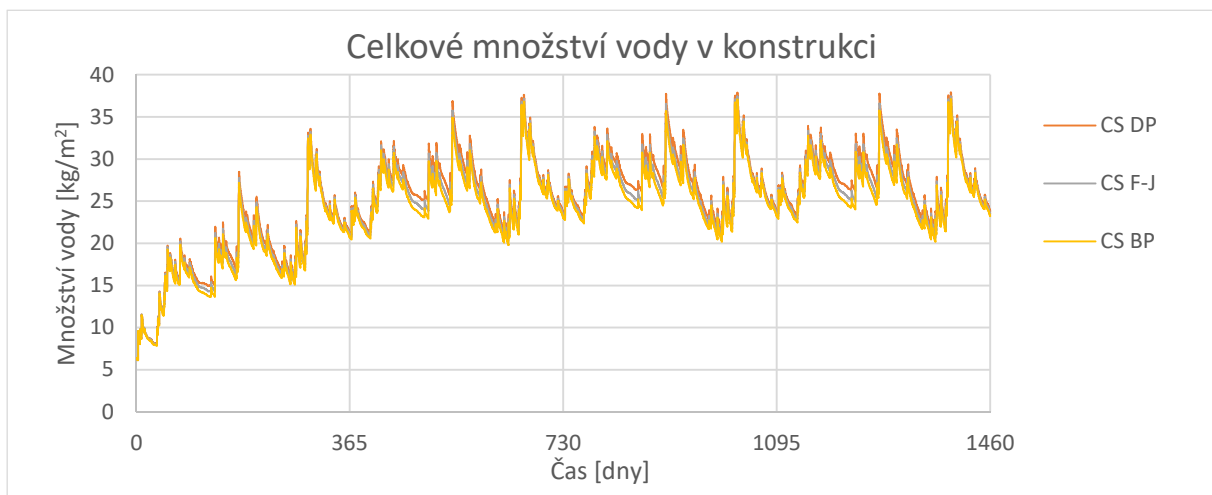
7.5 Výsledky simulace a diskuze

Následující grafy (obr. 67) ukazují zatížení konstrukce deštěm a slunečním zářením v dané lokalitě během 4 let. Graf množství srážek Zohledňuje zadané nepříznivé podmínky v podobě větrem hnaného deště za předpokladu plného zachycení všech dopadajících srážek na konstrukci.

Množství srážek a slunečního záření je pro všechny porovnávané konstrukce stejné a je rozhodujícím faktorem pro vývoj množství vody v konstrukci, který je patrný z grafu 68. Je vidět, že množství kondenzátu v konstrukci po prvním roce stoupl, ale v dalších letech se již ustaluje a opakuje se v ročních cyklech.

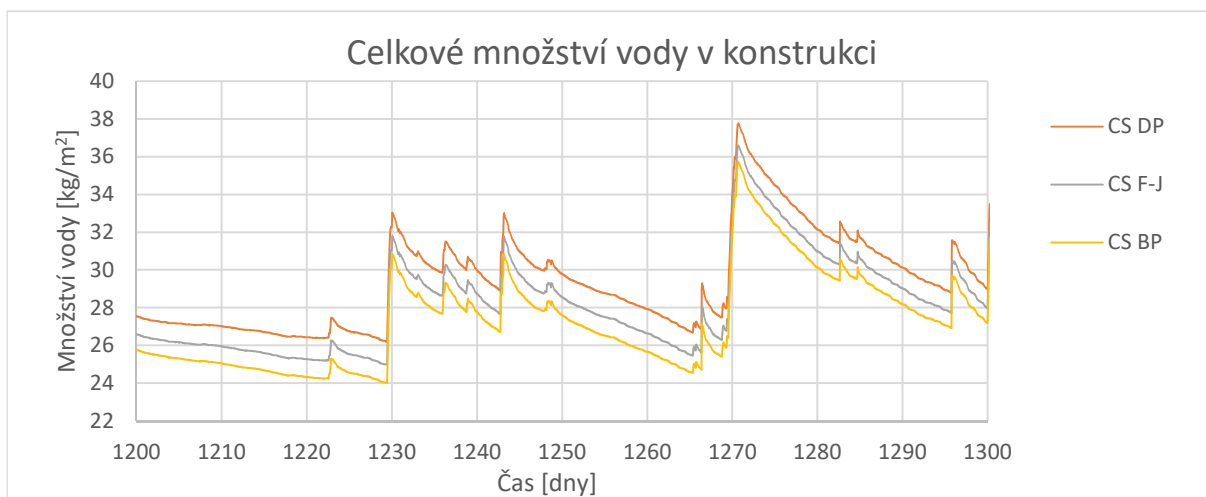


Obr. 67: Množství srážek a slunečního záření působící na konstrukci během 4 let



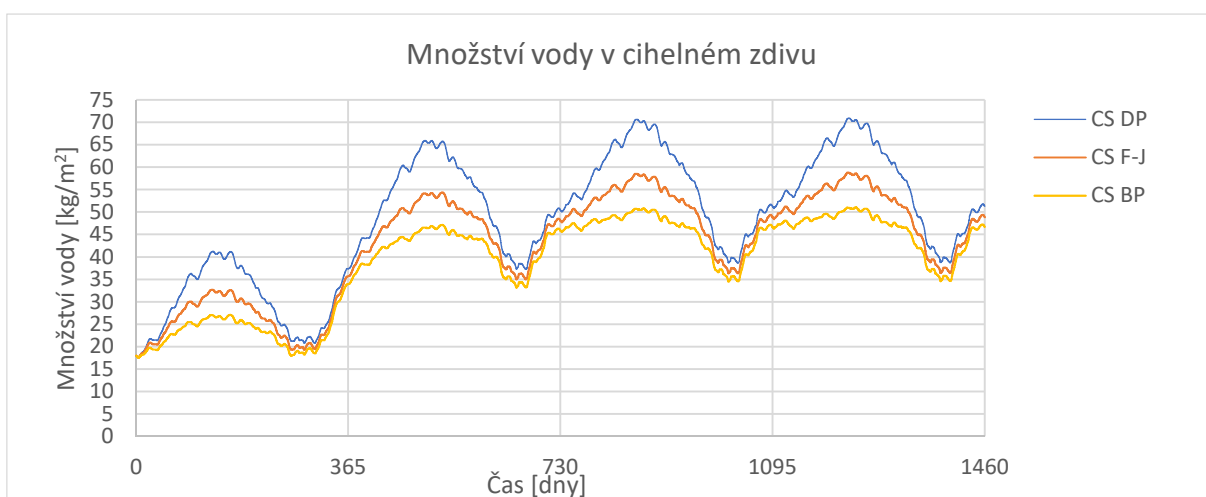
Obr. 68: Vývoj celkového množství vody v konstrukci během 4 let

V grafu jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými průběhy. To je dáno vlastnostmi jednotlivých kalcium-silikátových desek. Podrobněji je vidět rozdíl v grafu 69, který zobrazuje část posledního roku modelovaného období.



Obr. 69: Celkové množství vody v konstrukci během části posledního roku

Největší rozdíl, přibližně 2 kg/m^2 , je podle předpokladu zjištěn mezi konstrukcí, ve které je použita deska měřená v této práci a konstrukcí s deskou z bakalářské práce. Rozdíl mezi jednotlivými deskami ale není z grafu celkového množství vody v konstrukci tak patrný. Lépe jej lze pozorovat z následujících grafů množství vody v jednotlivých vrstvách konstrukce.



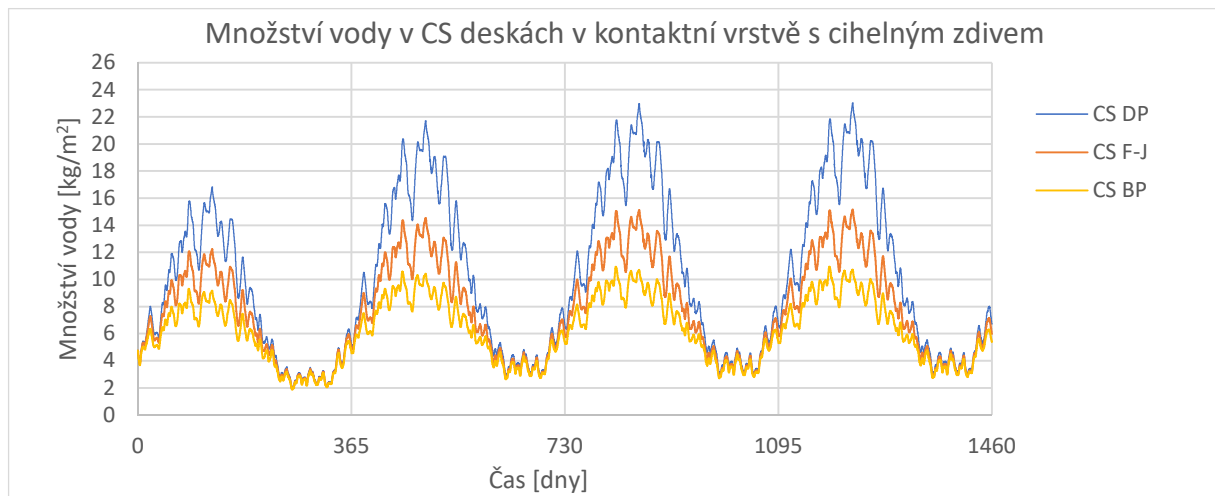
Obr. 70: Množství vody v cihelném zdivu ve vrstvě v kontaktu s kalcium-silikátovými deskami během 4 let

Rozdíl množství vody v poslední vrstvě cihelného zdiva, která je v kontaktu s vnitřní tepelnou izolací, je až 20 kg/m^2 .

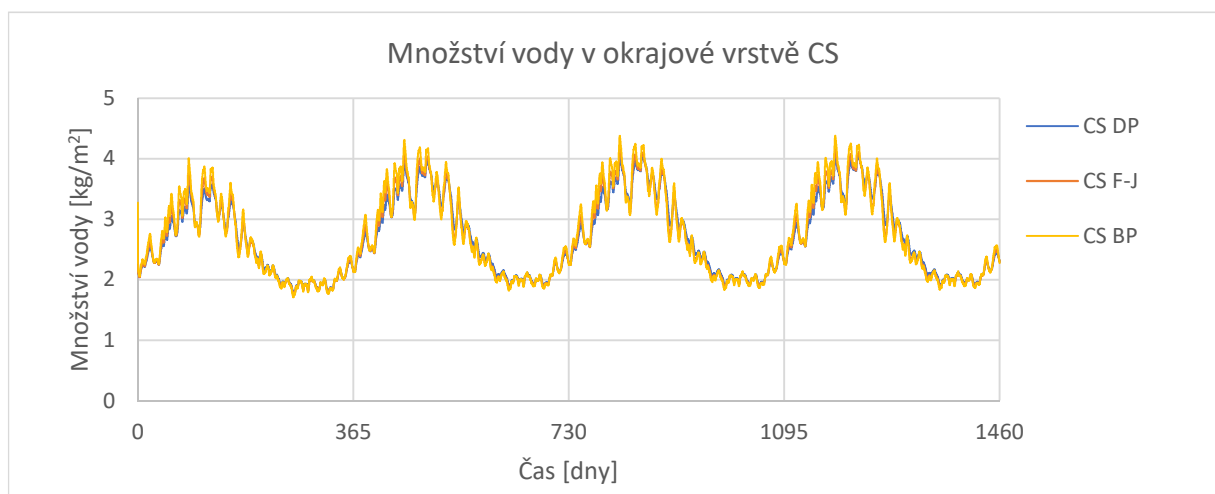
V celé tloušťce cihelného zdiva se hmotnostní vlhkost pro všechny tři případy pohybuje mezi 3,5 a 5,6 % hmotnosti. To dle ČSN P 73 0610 odpovídá nízké až zvýšené vlhkostní třídě. [30] Zvýšená vlhkost je během letních měsíců vždy odpařena, takže není ohrožena nosná funkce konstrukce.

Ve vrstvě kalcium-silikátových desek na rozhraní s cihelným zdivem je rozdíl množství vody přes 12 kg/m^2 . Diference se postupně zmenšuje, až je v okrajové vrstvě CS desek téměř

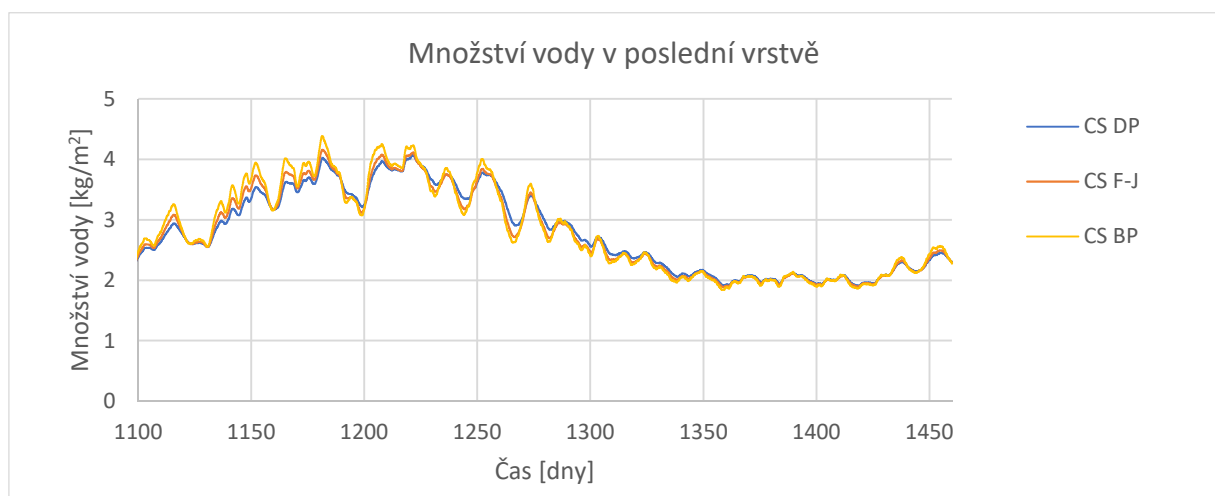
vyrovnána, viz grafy 71, 72 a 73. Graf 73 detailněji zobrazuje vývoj množství vody v okrajové vrstvě tepelné izolace v posledním roce modelovaného období.



Obr. 71: Množství vody v kalcium-silikátových deskách ve vrstvě v kontaktu s cihelným zdivem během 4 let

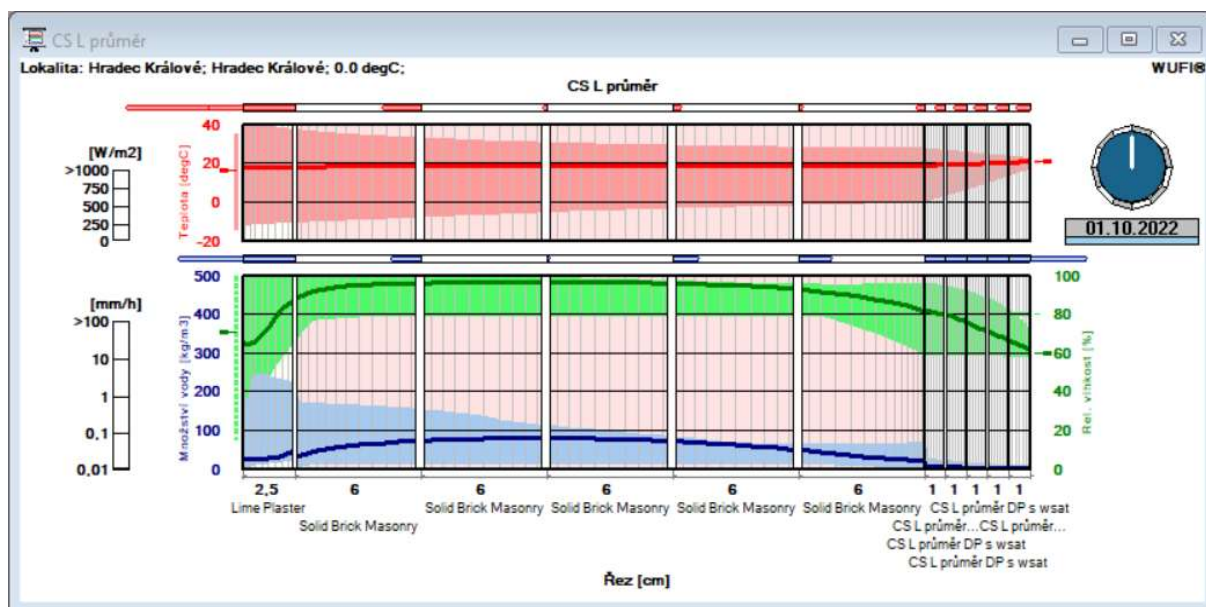


Obr. 72: Množství vody v okrajové vrstvě kalcium-silikátových desek během 4 let



Obr. 73: Množství vody v okrajové vrstvě kalcium-silikátových desek během posledního roku

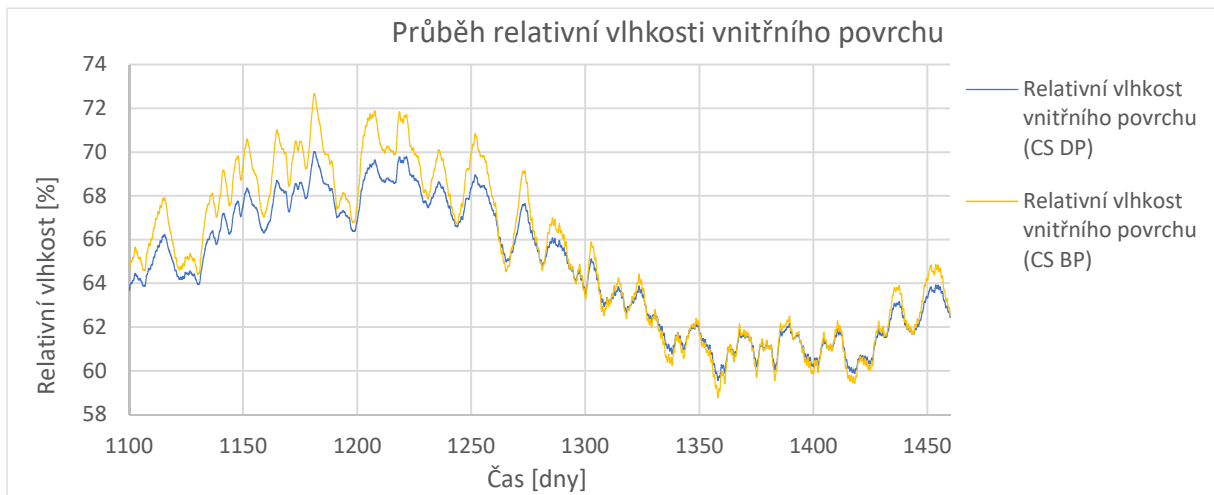
V grafu 74 je vidět průběh množství vody, relativní vlhkosti a teploty v řezu konstrukcí s tepelnou izolací CS_{DP}. Plné křivky zobrazují stav na konci modelovaného období, tedy 1. 10. 2022. Barevné oblasti značí, kam až hodnoty daných veličin sahaly v průběhu modelovaných 4 let. Je zde lépe vidět poměr množství vody na rozhraní cihelného zdiva a kalcium-silikátových desek.



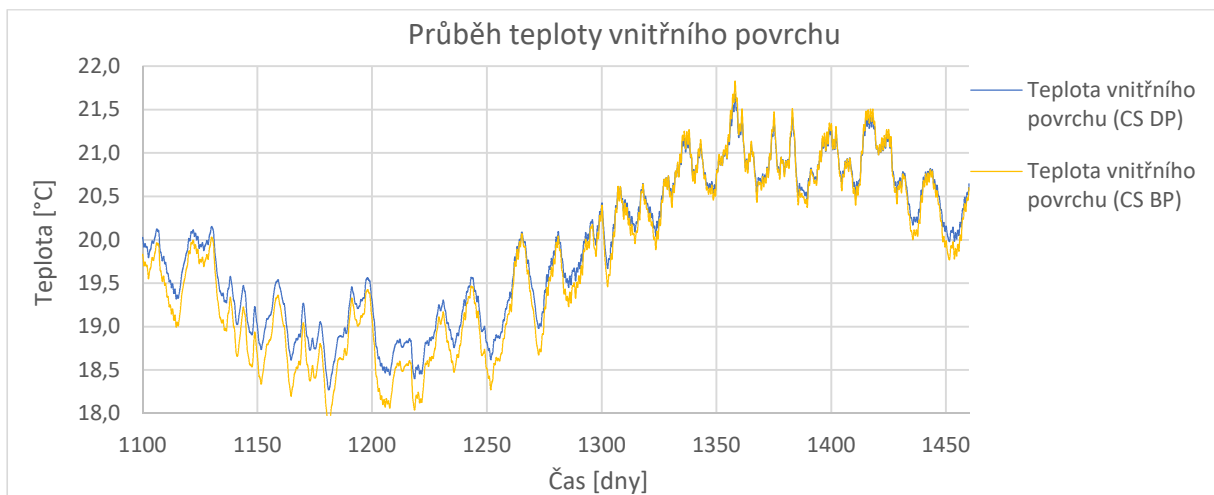
Obr. 74: Vývoj množství vody, relativní vlhkosti a teploty v konstrukci během 4 let

Při kontaktním zateplování z vnější strany konstrukce, by při stejných okrajových podmínkách byla větší nasákavost tepelných izolantů nežádoucí. V tomto konkrétním případě při využití vnitřní izolace a s vnitřní relativní vlhkostí 60 %, je vyšší absorpční koeficient výhodou. Z výsledků vyplývá, že díky vysoké vlhkostní vodivosti desek je možné zabránit kumulaci zkondenzované vody mezi tepelným izolantem a nosnou konstrukcí dokonce bez použití parozábrany.

Je evidentní, že absorpční koeficient materiálů ovlivňuje průběh a množství vody v jednotlivých vrstvách konstrukce. Desky CS_{BP} s vyšší nasákavostí odjímají kondenzát z cihelného zdiva více než ostatní a odvádějí jej pryč z konstrukce rychleji. To je patrné i na vlhkosti povrchu v interiéru. U CS_{BP} je vlhkost vnitřního povrchu až o 2,8 % vyšší než v případě CS_{DP}. To má dopad také na průběh teploty. Teplota vnitřního povrchu je v tomto případě pro CS_{BP} až o 0,3 °C nižší. Průběhy teploty a vlhkosti v posledním roce modelovaného období jsou vidět v grafech 75 a 76.



Obr. 75: Průběh relativní vlhkosti vnitřního povrchu během posledního roku



Obr. 76: Průběh teploty vnitřního povrchu během posledního roku

Z tohoto porovnání je patrné, že chybně naměřená data zkreslují tepelně vlhkostní analýzy a tím představu o vlhkostním průběhu v konstrukci.

Na základě takto naměřených dat nejen nasákavosti, ale i dalších vlastností, mohou být provedeny z hlediska stavební fyziky nekvalitní návrhy např. skladeb konstrukcí nebo konstrukčních detailů. Proto je důležité zpřesňování měření vlastností materiálů přísnějšími požadavky a přesnější specifikací podmínek a postupů.

8 Závěr

Tato diplomová práce stanovuje nasákavost absorpční zkouškou částečným ponořením. Zkoušky jsou provedeny na vzorcích kalcia-silikátu, dřevovláknů a konopí ve dvou laboratořích za podmínek reprodukovatelnosti. Naměřené výsledky jsou mezi laboratořemi porovnány.

Na vzorcích kalcia-silikátu je před samotným měřením nasákavosti zjišťována míra dopadu některých ovlivňujících faktorů měření. Podle výsledků přípravných experimentů jsou provedeny úpravy oproti požadavkům v normě ČSN EN ISO 15148 pro měření v této práci.

Mimo jiné bylo experimentálně ověřeno, že se zmenšující se plochou vzorku se zvyšuje vliv nevyhovujících okrajových podmínek na průběh zkoušky. Pokud pro izolaci bočních stran vzorku není použit nepropustný materiál, který s jistotou chemicky nereaguje, ani jinak neovlivňuje měřený materiál, měly by být pro velikost vzorku dodrženy požadavky normy. V opačném případě je možné kontaktní plochu zmenšit bez negativního vlivu na absorpční proces.

Dále bylo zjištěno, že pro účely další charakterizace materiálu a mezilaboratorního porovnání je vhodnější úplné vysušení vzorku. Spolehlivějším způsobem, než sušení v sušárně se ukázalo vysušení vzorku molekulovým sítem (nebo jiným vysoušedlem) při laboratorní teplotě.

Při porovnávání podložky z tahokovu a třech opěrných bodů nebyl prokázán žádný negativní vliv na průběh nasákavosti. Tento poznatek byl dále použit při návrhu vhodné metody měření přírodních vláknitých materiálů. Pro tyto účely byla vytvořena speciální klíčka, která udává přesnou kontaktní plochu s vodou pro neforemné vláknité materiály a poskytuje pevný rám pro izolování bočních stran těchto vzorků bez vytvoření průběžné kapilární spáry.

Při měření dynamické nasákavosti v čase vláknitých materiálů se ruční metoda ukázala být nepoužitelná. Proto je nutné tyto vzorky měřit automatizovanou metodou. Je však stále zapotřebí další vývoj metody měření pro bezproblémovou manipulaci se vzorky a zajištění vysoké opakovatelnosti zkoušky.

Dále bylo experimentálně dokázáno, že působením vysoké teploty na vzorky z dřevovláknů je struktura materiálu více uzavřena a materiál vykazuje mnohem menší nasákavost. Vzhledem k nedostatku podkladů k této problematice, by bylo přínosné dále pokračovat ve výzkumu takto modifikovaného materiálu. Provést mikroskopický nebo chemický rozbor a další sady experimentů pro zjištění vlivu na např. tepelněizolační a akustické vlastnosti. V případě zjištění příznivých hodnot by dřevovláknité tepelněizolační desky modifikované vysokou teplotou mohly mít potenciál inovativního materiálu.

Z výsledků absorpčního testu kalcia-silikátu jsou následně stanoveny nejistoty měření a jsou určovány mezilaboratorní chyby čtyř laboratoří.

Z tohoto mezilaboratorního porovnání vyplývá, že při dodržování předem dostatečně specifikovaných podmínek a při správně kontrole, je zkouška dobře opakovatelná i reprodukovatelná. V laboratořích jsou však doposud zřejmě používány různé postupy měření a zpracování dat, a proto se výsledky mohou značně lišit.

Zatím špatná reprodukovatelnost a nespolehlivé databáze materiálových vlastností dokazují, že je nutné důsledně proškolit provozovatele a stanovit přísnější a podrobnější požadavky na postupy měření.

To vyplývá i z výsledků simulace v programu WUFI, protože chybně naměřené výsledky zadané jako vstupní parametry zkreslily tepelně vlhkostní analýzy. Na základě nesprávně naměřených dat nejen nasákavosti, ale i dalších vlastností, mohou být provedeny z hlediska stavební fyziky nekvalitní návrhy např. skladeb konstrukcí a konstrukčních detailů.

Conclusion

This thesis determines water capillary uptake by partial immersion into water. The tests are carried out on samples of calcium-silicate, wood fibre and hemp in two laboratories under reproducibility conditions. The measured results are compared between the laboratories.

Before the capillary absorption test, the level of impact of some influencing factors is measured on the samples of calcium-silicate. According to the results of these experiments, modifications for measurements in this work are made.

Among other things, it was experimentally verified that the decreasing surface of samples increases the effect of unfavourable boundary conditions on the process of capillary uptake. The waterproof material, which does not chemically react or affect the measured material, has to be used for isolating the sides of the samples. In this case, the contact surface of the samples may be reduced in spite of the requirements in the standard ČSN EN ISO 15148 without any negative impact on the absorption process. If the material for isolating is not verified, the requirements of the standard should be met.

Furthermore, it has been found that it is more desirable to completely dry the sample for the purpose of material characterization and interlaboratory comparison. The drying of the samples by molecular sieves at a laboratory temperature is a more reliable way than drying in the oven.

It was found that the stainless steel washer does not affect water absorption process. This finding was further used in the design of suitable methods for measuring natural fibre materials. For this purpose, a special cage from the stainless steel has been formed. This cage creates the precise contact surface of the fibrous materials with water and provides a rigid frame for insulating the lateral sides of these samples without creating a continuous capillary joint.

It was shown that the manual method is not applicable for measuring the dynamic water absorption for fibrous materials. Therefore, these samples must be measured by an automated method. However, it is still necessary to develop and improve the measurement methods for seamless handling of samples and ensuring high repeatability of tests.

In addition, it has been experimentally shown that the high temperature acting on wood fibre affects the structure of the material.

The structure of the material is more closed and the material exhibits a less water absorption. Due to the absence of literature on this issue, it would be advisable to continue to research this modified material. To perform microscopic or chemical analysis and other experiments to determine the effect on thermal and acoustic properties. In case of obtaining favourable results,

the wood fibre board modified by high temperature could have the potential of innovative material.

Subsequently, the uncertainties of measurement and the between-lab errors are determined from the results of the absorption test of the calcium-silicate from four laboratories.

This interlaboratory comparison shows that the test is well repeatable and reproducible if the requirements are precisely specified in advance and the measurement is under proper control. However, operators from various laboratories still use various methods of measurement and data processing, and therefore the results may be quite different.

Poor reproducibility and unreliable database of material properties have demonstrated the need for setting stricter and more detailed requirements for measurement procedures.

This is also proven by the WUFI software. The misquoted results of the measurements entered as input parameters distorted the thermal moisture analysis. From the point of view of building physics, the structural design and the structural details could be incorrectly made, if the design is based on incorrectly measured data of water absorption or other properties.

Citatce

- [1] FENG, Chi a Hans JANSSEN. Hygric properties of porous building materials: Analysis of measurement repeatability and reproducibility. *Building and Environment*. 2015, **85**, 160-172. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.036. ISSN 03601323. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132314004089>
- [2] ČSN EN ISO 15148: *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení nasákavosti částečným ponořením*. 1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [3] ČSN ISO 21748: *Návod pro použití odhadů opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a pravdivosti při odhadování nejistoty měření*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 40 s.
- [4] HAGENTOFT, Carl-Eric. *Introduction to building physics*. Lund: Studentlitteratur, 2001. ISBN 91-440-1896-7.
- [5] BALÍK, Michael. *Odvhlčování staveb*. 2. přeprac. vyd. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2693-9.
- [6] PAVLÍK, Zbyšek. *VLASTNOSTI STAVEBNÍCH HMOT VE VZTAHU K JEJICH STRUKTUŘE II* [online]. Praha, b.r. [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MI%20I/studmat/vlastnosti_II.pdf. Přednáška. ČVUT, FSv, katedra Materiálového inženýrství a chemie.
- [7] FENG, Chi a Hans JANSSEN. Hygric properties of porous building materials (III): Impact factors and data processing methods of the capillary absorption test. *Building and Environment*. 2018, (134), 21-34.
- [8] KORECKÝ, Tomáš. Součinitel vlhkostní vodivosti různých typů pískovců. *STAVEBNÍ OBZOR: The civil engineering journal*. Praha: CTU in Prague, 2006, **2014**(1-2), 16-19. ISSN 1805-2576.
- [9] ŠKRAMLÍK, Jan. *Kapilární vodivost stavební hmoty: Capillary conductivity in the building material : zkrácená verze habilitační práce*. 1. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3981-8.

- [10] ČSN EN 1609: *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení krátkodobé nasákavosti při částečném ponoření*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s.
- [11] ČSN EN 12087: *Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Stanovení dlouhodobé nasákavosti při ponoření*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s.
- [12] DRDÁCKÝ, Miloš. Určování materiálových charakteristik historických konstrukcí: Terénní měření nasákavosti porézních materiálů. *Prispevek technických ved k zachrane a restaurovani pamatek* [online]. Ustav teoreticke a aplikovane mechaniky AV CR, v. i, 2015, , 61-72 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.21495/49-9.61-72. ISBN 9788086246499. Dostupné z: <http://www.itam.cas.cz/publications>
- [13] TSE, Thomas. Water movement in porous building materials—VII. The sorptivity of mortars. *Building and Environment*. 1986, **21**(2), 113-118. DOI: 10.1016/0360-1323(86)90017-X. ISSN 03601323. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/036013238690017X>
- [14] Izolační deska SKAMOTEC 225: tl. 40 mm (1000 x 610 mm). *NEJEN KRBY.cz* [online]. b.r. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.nejenkrby.cz/izolacni-deska-skamotec-225-tl-40-mm-1000-x-610-mm/p-2239>
- [15] STEICOflex 038: flexibilní tepelná izolace. *STEICO: Stavební systém z přírody* [online]. b.r. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: https://www.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/Czech/Products/STEICOflex_038_cz_i.pdf
- [16] TERMO-KONOPI® PREMIUM: Technický list. *Termo izolace: z technického konopi* [online]. 2011 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: http://www.konopi-izolace.cz/files/attachments/tl_termo-konopi_premium_cz_0.pdf
- [17] Vnitřní izolace staveb: izolační desky CALSITHERM KLIMAPLATTE. *EBK ERET BERNARD* [online]. b.r. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.ebk.cz/vnitri-izolace-staveb/izolacni-desky>
- [18] WEGERER, Paul. Measuring the Hygrothermal Performance of an Interior Insulation Made of Woodfibre Boards. *Energy Procedia*. Elsevier, 2015, **2015**(78), 1478-1483. ISSN 1876-6102. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.173>

- [19] CHYBÍK, Josef. *Přírodní stavební materiály*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2009, 272 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [20] HAMERNÍK, Ivo. *Pasivní domy* [online]. 2016. Praha: Code Creator, 2016 [cit. 2017-05-01]. ISBN 978-80-88058-11-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/92/04.html>
- [21] ŠÍPKOVÁ, Veronika, Šárka KORBEOVÁ a Jiří LABUDEK. *Stavební tepelné izolace pro svislé konstrukce* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014 [cit. 2017-05-06]. ISBN 978-80-248-3661-4. Dostupné z: <http://mladivyzkumnici.cz/cz/>
- [22] ŠKOPEK, Jan. Tepelná izolace z technického konopí. *Konopa: Občanské sdružení* [online]. Praha, b.r. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.konopa.cz/stavebnictvi/tepelna-izolace-z-technickeho-konopi.html>
- [23] KYMÄLÄINEN, Hanna-Riitta. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*. Elsevier, 2008, **2008**(43), 1261–1269. ISSN 0360-1323. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- [24] HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*. 1989, **41**(147), 51-61. DOI: 10.1680/mac.1989.41.147.51. ISSN 0024-9831. Dostupné také z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/mac.1989.41.147.51>
- [25] ČSN ISO 5725-1: *Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření: Část 1: Obecné zásady a definice*. 1. 2018, 28 s.
- [26] SCHŮTOVÁ, Petra. *Tepelně izolační materiály a jejich využití ve stavebních konstrukcích*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, katedra materiálového inženýrství a chemie. Vedoucí práce Ing. Miloš Jerman, Ph.D.
- [27] ESTEVES, Bruno a Helena PEREIRA. Wood modification by heat treatment:: A review. *BioResources*. 2009, **4**(1), 370-404.
- [28] NOVÁK, Petr. Tepelná modifikace dřeva: I.,II.,III. *Dřevostavitel: online svět dřevostaveb* [online]. 2011 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/tepelna-modifikace-dreva-1-dil>
- [29] Ochrana proti ohni: Protipožární konstrukce s požární odolností až REI 60. In: *STEICO: Stavební systémy z přírody* [online]. b.r. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.steico.com/cz/steico-vyhody/pozar/>

- [30] ČSN P 73 0610: *Hydroizolace staveb - Sanace vlhkého zdiva - Základní ustanovení*.
1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2000, 20 s.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Poměr matrice ku objemu pórů a odpovídající množství uložené vody v materiálu (inspirováno [4]) | 9 |
| Obr. 2: Trubice v kontaktu s volnou hladinou vody (inspirováno [4])..... | 10 |
| Obr. 3: Sání vody suchým vzorkem (inspirováno [4]) | 11 |
| Obr. 4: Karstenova trubice při měření in-situ [12] | 16 |
| Obr. 5: Měření mikrotrubicí in-situ na ideálním povrchu [12]..... | 18 |
| Obr. 6: Laboratorní varianta měření mikrotrubicí [12]..... | 19 |
| Obr. 7: Automatizované měření v laboratoři UPV | 19 |
| Obr. 8: Schéma uspořádání experimentální měřící aparatury [9]..... | 20 |
| Obr. 9: Jedno-tečná metoda pro výpočet A_{cap} – variabilitnost výběru dat u materiálů s nepravidelnou 1. fází [7] | 22 |
| Obr. 10: Modifikovaná jedno-tečná metoda pro výpočet A_{cap} [7] | 22 |
| Obr. 11: Dvou-tečná metoda pro výpočet A_{cap} [7]..... | 23 |
| Obr. 12: Jednobodová metoda pro výpočet A_{cap} s různým t_{end} u materiálů s nepravidelnou 1. fází [7] | 24 |
| Obr. 13: Hallova metoda pro výpočet A_{cap} [7]..... | 25 |
| Obr. 14: „F – J.“ metoda pro výpočet A_{cap} [7]..... | 25 |
| Obr. 15: Srovnání výsledků A_{cap} získaných různými metodami [7]..... | 26 |
| Obr. 16: Stanovení w_{cap} [7] | 27 |
| Obr. 17: Vzorky kalcia-silikátu různých velikostí..... | 30 |
| Obr. 18: Vzorky dřevovláknů různých velikostí..... | 31 |
| Obr. 19: Vzorky konopí různých velikostí | 32 |
| Obr. 20: Speciální klíčky z tahokovu z nerezové oceli pro absorpční test vláknitých materiálů | |
| Obr. 21: Pravdivost a preciznost (inspirováno [1])..... | 41 |
| Obr. 22: Proces výpočtu chyby reprodukovatelnosti (inspirováno [1])..... | 44 |
| Obr. 23: Grafické porovnání způsobu izolování bočních stran vzorků CS | 49 |
| Obr. 24: Grafické porovnání různého způsobu uložení vzorků CS do vody..... | 50 |
| Obr. 25: Grafické porovnání různých velikostí vzorků CS | 50 |

| | |
|---|----|
| Obr. 26: Výsledné křivky nasákavosti vzorků CS v laboratoři UCEEB | 51 |
| Obr. 27: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků CS měřených v laboratoři UCEEB..... | 52 |
| Obr. 28: Výsledné křivky nasákavosti vzorků CS v laboratoři UPV | 53 |
| Obr. 29: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze nasákavosti vzorků CS měřených v laboratoři UPV | 53 |
| Obr. 30: Výsledné křivky nasákavosti vzorků CS _L měřené automatizovanou metodou | 54 |
| Obr. 31: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze nasákavosti vzorků CS měřené automatizovanou metodou..... | 54 |
| Obr. 32: Porovnání materiálů pro izolování bočních stran kalcia-silikátu: vlevo (a) transparentní tmel a lepidlo Pattex; vpravo (b) asfaltová páska | 55 |
| Obr. 33: Grafické porovnání nasákavosti CS v závislosti na velikosti vzorků..... | 56 |
| Obr. 34: Grafické porovnání nasákavosti CS v závislosti na velikosti vzorků – detailní zobrazení..... | 56 |
| Obr. 35: Geometrické znázornění poměru obvodu ku ploše čtverce v závislosti na délce strany | |
| Obr. 36: Porovnání vlivu izolování bočních stran v závislosti na velikosti vzorku | 57 |
| Obr. 37: Detailní geometrické znázornění vlivu uložení vzorků..... | 58 |
| Obr. 38: Geometrické znázornění vlivu způsobu měření | 59 |
| Obr. 39: Detailní geometrické znázornění vlivu způsobu měření | 59 |
| Obr. 40: Grafické vyjádření průměrného absorpčního koeficientu vzorků měřených v laboratoři UCEEB s rozšířenou nejistotou měření | 61 |
| Obr. 41: Grafické vyjádření průměrného absorpčního koeficientu vzorků měřených v laboratoři UCEEB s rozšířenou nejistotou měření | 61 |
| Obr. 42: Grafické porovnání různých velikostí vzorků WF měřených v laboratoři UCEEB | 65 |
| Obr. 43: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků WF měřených v laboratoři UCEEB | 65 |
| Obr. 44: Grafické porovnání vzorků WF měřených v laboratoři UPV | 66 |
| Obr. 45: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků WF měřených v laboratoři UPV | 66 |
| Obr. 46: Grafické porovnání vzorků WF sušených při teplotách 105 a 130 °C | 67 |
| Obr. 47: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků WF sušených při vysoké teplotě..... | 67 |
| Obr. 48: Grafické porovnání všech vzorků WF při různém způsobu sušení..... | 68 |
| Obr. 49: Vzorky dřevovláknů před a po sušení za vysoké teploty..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Obr. 50: Grafické porovnání vlivu teploty sušení vzorků WF na nasákavost | 70 |
| Obr. 51: Grafické porovnání různých velikostí vzorků H měřených v laboratoři UCEEB... | 71 |
| Obr. 52: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků H měřených v laboratoři UCEEB..... | 72 |
| Obr. 53: Grafické porovnání vzorků H měřených v laboratoři UPV | 72 |
| Obr. 54: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků H měřených v laboratoři UPV | 73 |
| Obr. 55: Grafické porovnání vzorků H sušených při teplotě 105 °C | 73 |
| Obr. 56: Průměrné hodnoty naměřených dat 1. fáze absorpčního procesu vzorků H sušených při vysoké teplotě..... | 74 |
| Obr. 57: Grafické porovnání průměrných křivek nasákavosti H..... | 75 |
| Obr. 58: Grafické porovnání křivek nasákavosti měřených materiálů | 76 |
| Obr. 59: Grafické porovnání absorpčního koeficientu měřených materiálů..... | 77 |
| Obr. 60: Výsledky počítačové simulace absorpčního testu CS [WUFI Pro 6.2]..... | 79 |
| Obr. 61: Grafické porovnání experimentu nasákavosti a modelu v programu WUFI Pro 6.2 | |
| Obr. 62: Zjišťování vlivu teploty a relativní vlhkosti na průběh křivek nasákavosti v programu WUFI Pro 6.2..... | 80 |
| Obr. 63: Grafické porovnání křivek nasákavosti z programu WUFI Pro 6.2 | 80 |
| Obr. 64: Zjednodušená skladba konstrukce historického domu | 81 |
| Obr. 65: Přestupové součinitele povrchů [WUFI® Pro 6.2]..... | 82 |
| Obr. 66: Sluneční záření a množství srážek působící na konstrukci [WUFI® Pro 6.2] | 82 |
| Obr. 67: Množství srážek a slunečního záření působící na konstrukci během 4 let | 83 |
| Obr. 68: Vývoj celkového množství vody v konstrukci během 4 let..... | 83 |
| Obr. 69: Celkové množství vody v konstrukci během části posledního roku | 84 |
| Obr. 70: Množství vody v cihelném zdivu ve vrstvě v kontaktu s kalcium-silikátovými deskami během 4 let | 84 |
| Obr. 71: Množství vody v kalcium-silikátových deskách ve vrstvě v kontaktu s cihelným zdivem během 4 let..... | 85 |
| Obr. 72: Množství vody v okrajové vrstvě kalcium-silikátových desek během 4 let..... | 85 |
| Obr. 73: Množství vody v okrajové vrstvě kalcium-silikátových desek během posledního roku | |
| Obr. 74: Vývoj množství vody, relativní vlhkosti a teploty v konstrukci během 4 let..... | 86 |
| Obr. 75: Průběh relativní vlhkosti vnitřního povrchu během posledního roku | 87 |
| Obr. 76: Průběh teploty vnitřního povrchu během posledního roku | 87 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Výška vody v trubici jako funkce poloměru | 11 |
| Tab. 2: Některé materiálové charakteristiky z technických listů výrobců [14] [15] [16]..... | 29 |
| Tab. 3: Koeficient k_x v závislosti na počtu měření (vzorků)..... | 42 |
| Tab. 4: Výsledky jednotlivých vzorků CS měřených v laboratoři UCEEB | 52 |
| Tab. 5: Výsledky jednotlivých vzorků CS měřených v laboratoři UPV..... | 55 |
| Tab. 6: Směrodatné odchylky absorpčního koeficientu typu A, B a kombinovaná a rozšířená odchylka vzorků CS..... | 60 |
| Tab. 7: Numerické porovnání výsledků vzorků CS..... | 62 |
| Tab. 8: Statistické porovnání desek kalcia-silikátu měřených v různých laboratořích..... | 62 |
| Tab. 9: Mezilaboratorní porovnání | 63 |
| Tab. 10: Průměrné absorpční koeficienty vzorků WF z obou laboratoří..... | 69 |
| Tab. 11: Průměrné absorpční koeficienty vzorků H z obou laboratoří..... | 75 |
| Tab. 12: Průměrné absorpční koeficienty měřených materiálů | 76 |
| Tab. 13: Součinitel vlhkostní vodivosti měřených materiálů | 77 |