



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí pozemních staveb**

**Vysychání monolitických betonových podlah do dřevostaveb**

**Drying of monolithic concrete floors in wooden buildings**

Diplomová práce

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D

**Bc. Jiří Křivonožka**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Křivonožka

Jméno: Jiří

Osobní číslo: 409779

Zadávací katedra: K124 Katedra konstrukcí pozemních staveb

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vysychání monolitických betonových podlah do dřevostaveb

Název diplomové práce anglicky: drying of monolithic concrete floors in wooden buildings

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše složení a provádění betonových podlah.
2. Teoretická analýza problému vysychání betonových podlah.
3. Laboratorní zkoušky pro zjištění vlhkostních vlastností vybraných směsí betonových podlah (faktor difuzního odporu, sorpční křivka, průběh vysychání).
4. Sledování vysychání betonové podlahy v reálné dřevostavbě (pokud se povede získat přístup).
5. Matematické modelování procesu vysychání a) v samotném materiálu a b) v betonové podlaze v modelové budově (vliv tepelně vlhkostního režimu budovy na proces vysychání).

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 23. 02. 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20. 5. 2018

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci napsal samostatně a výhradně s užitím citovaných zdrojů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejněním.



## Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou vysychání vody z monolitických betonových podlah do dřevostaveb. Vysycháním vody dochází ke značnému transportu vlhkosti do interiéru stavby. Tato diplomová práce zkoumá, zda může mít proces vysychání negativní vliv na přilehlé dřevěné konstrukce. Je vytvořen matematický model simulující vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby, který je validován s pomocí dostupného výpočtového softwaru a také s provedeným experimentem vysychání. S pomocí matematického modelu je zkoumán vliv vytápění a větrání dřevostavby na délku vysychání betonové podlahy.

## Klíčová slova

Cementový potěr, betonová mazanina, dřevostavba, objemová hmotnost, pórovitost, sorpční izoterma, faktor difuzního odporu, hmotnostní vlhkost, transport vlhkosti, difuze vodních par, vysychání betonu, větrání, vytápění.

## Abstract

This thesis deals with water drying of monolithic concrete floors in wooden buildings. Drying of water from concrete floors leads to a considerable transport of moisture to the interior of the building. This diploma thesis examines whether the drying process can have a negative impact on wooden structures in building. A mathematical model is created to simulate water desiccation from concrete floors into a wooden building. This model is validated with using the available computing software and also with the drying experiment, performed in this thesis. Mathematical model is used for investigating the influence of heating and ventilation of wooden buildings on the length of the concrete floor drying.

## Key words

Cement screed, wooden building, volumetric mass density, porosity, sorption isotherm, vapour transfer coefficient, mass uptake, moisture transport, moisture diffusion, concrete drying, ventilation, heating.



## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mi pomohli při tvorbě této práce. Především Ing. Pavlu Kopeckému, Ph.D. za vedení práce, dále Ing. Michalu Burešovi za svolení s monitoringem vysychání betonové podlahy na jeho stavbě, Ing. Danielu Šmídovi za poskytnuté informace o složení betonových směsí a Mgr. Radimu Pechalovi za technickou podporu při provádění experimentu vysychání.



## Obsah

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
1.1 RIZIKA SPOJENÁ S VYSYCHÁNÍM VODY Z BETONOVÉ PODLAHY DO DŘEVOSTAVEB .....	8
1.1.1 Průzkum vysychání betonové podlahy na reálné dřevostavbě .....	9
1.1.2 Shrnutí rizik spojených s vysycháním betonové podlahy do dřevostaveb.....	12
1.2 TERMÍNY A DEFINICE .....	12
1.3 CÍL PRÁCE .....	13
<b>2 PRŮZKUM VLASTNÍCH BETONOVÝCH SMĚSÍ.....</b>	<b>14</b>
2.1 PRŮZKUM SLOŽENÍ BĚŽNĚ UŽÍVANÝCH BETONOVÝCH SMĚSÍ .....	14
2.2 NÁVRH SMĚSÍ .....	15
2.2.1 Směs I.....	16
2.2.2 Směs II.....	16
2.2.3 Směs III.....	16
2.3 LABORATORNÍ MĚŘENÍ .....	16
2.3.1 Provádění betonových vzorků .....	17
2.3.2 Měření objemové hmotnosti suchého betonu .....	17
2.3.3 Obsah vody ve vlhkém vzorku po vybetonování, odhad pórovitosti.....	19
2.3.4 Měření sorpční izotermy.....	20
2.3.5 Měření faktoru difuzního odporu.....	23
2.3.6 Shrnutí naměřených hodnot.....	27
2.4 EXPERIMENT VYSYCHÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ .....	28
2.4.1 Okrajové podmínky.....	29
2.4.2 Naměřené hodnoty.....	29
2.4.3 Posouzení naměřených hodnot, analýza výsledků.....	32
<b>3 MATEMATICKÝ MODEL VYSYCHÁNÍ VODY Z BETONOVÉ PODLAHY .....</b>	<b>34</b>
3.1 PRŮZKUM DOSTUPNÝCH VÝPOČTOVÝCH SOFTWARŮ PRO TRANSPORT TEPLA A VLHKOSTI .....	34
3.2 POPIS MODELU .....	35
3.2.1 Matematický model vysychání vody z betonové podlahy .....	36
3.2.2 Matematický model horní stavby .....	41
3.2.3 Napojení matematického modelu vysychání vody z betonové podlahy na model horní stavby.....	45
3.3 VALIDACE MATEMATICKÉHO MODELU .....	45
3.3.1 Srovnání se softwarem Wufi .....	45
3.3.2 Modelování experimentu vysychání z kapitoly 2.4 .....	50



# Vysychání monolitických betonových podlah do dřevostaveb

Jiří Krivonožka 2017 / 2018

3.3.3 Závěry z validace matematického modelu .....	59
<b>4 PŘÍPADOVÁ STUDIE VYSYCHÁNÍ VODY Z BETONOVÉ PODLAHY DO DŘEVOSTAVBY .....</b>	<b>60</b>
4.1 STANOVENÍ CÍLŮ PŘÍPADOVÉ STUDIE .....	60
4.2 VSTUPNÍ HODNOTY PŘÍPADOVÉ STUDIE .....	61
4.3 PŘÍPADOVÁ STUDIE PRO LETNÍ OBDOBÍ .....	62
4.3.1 Okrajové podmínky.....	62
4.3.2 Vypočtené hodnoty.....	63
4.3.3 Vyhodnocení.....	69
4.4 PŘÍPADOVÁ STUDIE PRO ZIMNÍ OBDOBÍ .....	71
4.4.1 Okrajové podmínky.....	71
4.4.2 Vypočtené hodnoty.....	71
4.4.3 Vyhodnocení případové studie vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby.....	77
<b>5 ZÁVĚR.....</b>	<b>79</b>
5.1 SHRNUTÍ RELEVANTNOSTI MATEMATICKÉHO MODELU .....	79
5.2 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ PŘÍPADOVÉ STUDIE .....	79
5.3 SPLNĚNÍ STANOVENÝCH CÍLŮ PRÁCE.....	80
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>81</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>83</b>
<b>1 PŘÍLOHA: FOTODOKUMENTACE PROVÁDĚNÍ BETONOVÝCH VZORKŮ .....</b>	<b>83</b>
<b>2 PŘÍLOHA: FOTODOKUMENTACE SUŠENÍ BETONOVÝCH VZORKŮ .....</b>	<b>84</b>



## 1 Úvod

Tato práce se zabývá problematikou odparu vody z betonových podlah do dřevostaveb. Při plánování stavebních prací zaujímá vysychání betonu důležité místo, protože po něm následuje nutná technologická přestávka. Velkým pozitivem dřevostaveb je jejich rychlá výstavba, proto je často kladen důraz na zkrácení této přestávky a tím urychlení celé stavby. Doba, ze kterou betonová podlaha vyschne na požadovanou vlhkost, je však závislá na fyzikálních vlastnostech okolního vzduchu. Proto může betonová podlaha v zimních měsících, kdy je teplota vzduchu nízká, vysychat velmi dlouho. Otázkou je, zda může mít zpomalení procesu vysychání negativní dopad na celou dřevostavbu a zda existuje účinný způsob, jak proces vysychání urychlit.

### 1.1 Rizika spojená s vysycháním vody z betonové podlahy do dřevostaveb

Abychom určili rizika spojená s vysycháním vody z betonových podlah v dřevostavbách, je nutné nejprve zmapovat, jak betonáž probíhá. Proces betonování je při realizaci staveb obvykle prováděn ve dvou případech.

V prvním případě se jedná o realizaci betonové desky na zemině, často sloužící jako základová deska. Jedná se ve většině případů o desku tloušťky 150 až 250 mm. Takto mocná vrstva betonu obsahuje velké množství záměsové vody, která se při vysychání odpařuje do okolního ovzduší. Tato vrstva je však často zakryta hydroizolačním souvrstvím, které zabraňuje vysychání desky do interiéru stavby. Nehrozí tak riziko hromadění vody ve stavebních konstrukcích.

Druhou etapou betonáže při výstavbě dřevostaveb je realizace betonových podlah. Ty se často zhotovují až po dokončení obálky budovy. Většina projektantů se snaží minimalizovat infiltraci vzduchu skrz obálku budovy, aby nedocházelo k nežádoucím únikům tepla v zimních měsících. Tím je však zároveň zabráněno odvodu vodních par z vysychající betonové vrstvy do venkovního prostředí.

Při odparu vody z betonových podlah do dřevostaveb tedy může dojít k hromadění vody v dřevěných konstrukcích budovy a tím vzrůstá riziko degradace těchto konstrukcí.





### **1.1.1 Průzkum vysychání betonové podlahy na reálné dřevostavbě**

Pro podrobnější definici této problematiky byl proces vysychání betonové podlahy do dřevostavby monitorován na skutečné stavbě. Stavba se nachází v Praze 17 a stavitelem je Ing. Michal Bureš, který svolil k osazení vlhkostních a teplotních senzorů do budovy v průběhu betonování roznášecí vrstvy podlahy s podlahovým vytápěním. Jednalo se o podsklepenou dřevostavbu se dvěma nadzemními podlažími. Střecha budovy je plochá a konstrukční systém je typu lehký skelet. Obvodové stěny a strop jsou opláštěny konstrukčními deskami OSB. Jedná se o desky s vyšším faktorem difuzního odporu, které jsou vzájemně spojeny na pero a drážku a kotveny do dřevěných sloupků pomocí kotevních vrutů s difuzně nepropustnou podložkou. V době betonáže již byly osazeny výplně otvorů. Obálka budovy tedy byla téměř kompletní a tím zamezovala odparu vodní páry do venkovního prostředí.

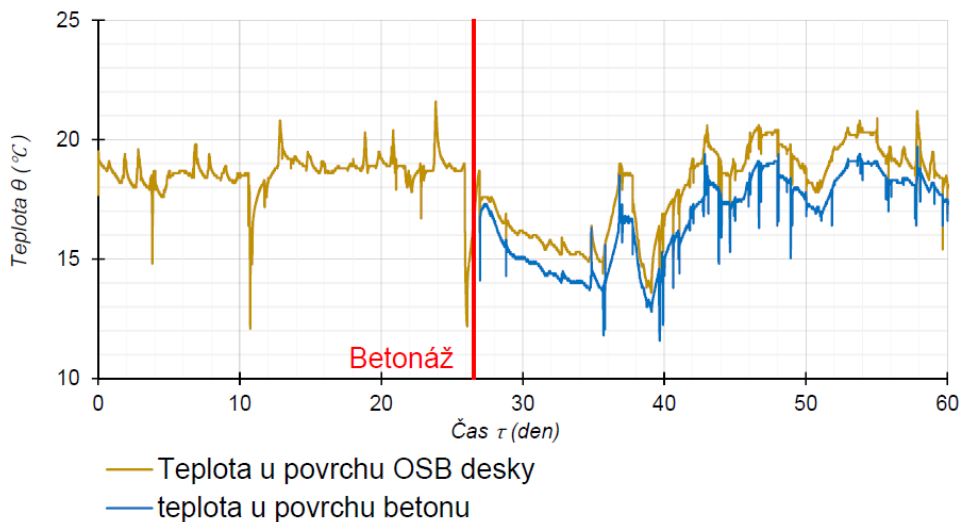
#### **a) Postup měření**

Necelý měsíc před zahájením betonáže, dne 24. 11. 2017 byly na stavbě osazeny dotykové senzory pro měření hmotnostní vlhkosti AHLBORN ALMEMO FH a senzory snímající teplotu vzduchu Digital AHLBORN ALMEMO FHAD. Senzory byly připevněny k vnitřní příčce budovy na desku OSB. Další senzory byly umístěny po betonáži na betonovou podlahu. V místnosti byl po celou dobu měření osazen temperature-humidity logger, jež zaznamenával teplotu a vlhkost vnitřního vzduchu.

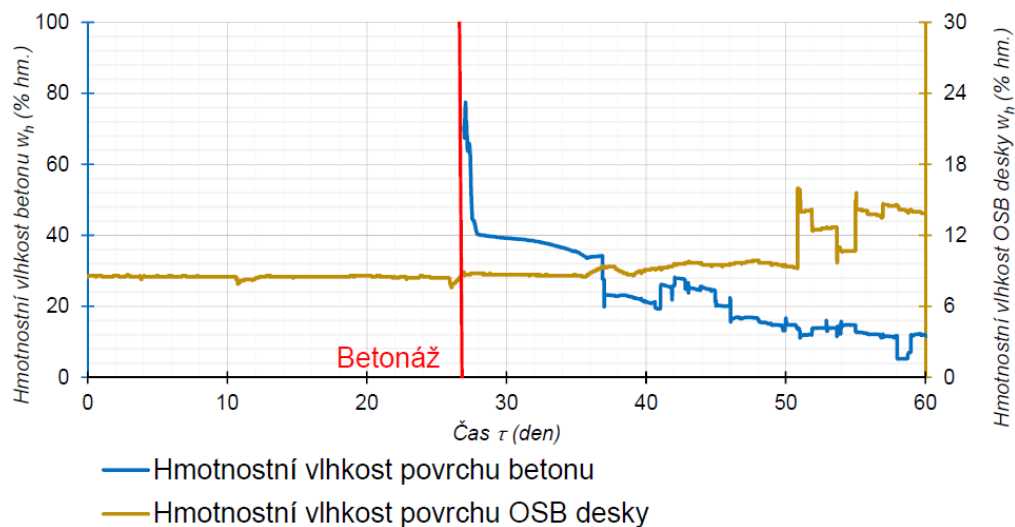
Betonáž podlahy byla provedena dne 20. 12. 2017 v 15 hod. Zmíněné senzory byly na betonovou podlahu položeny 24 hodin po betonáži. Budova byla v době měření vytápěná.

#### **b) Naměřené hodnoty**

Senzory měřily teplotu a vlhkost, přičemž každých 10 minut došlo k výpočtu průměrné teploty, jež byla uložena do paměti dataloggeru. Naměřené hodnoty z příslušných senzorů shrnují Graf 1.1.1-1 a Graf 1.1.1-2.



Graf 1.1.1-1: Naměřený průběh teplot u povrchu OSB desky a u povrchu betonu



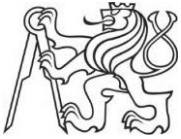
Graf 1.1.1-2: Naměřený průběh hmotnostní vlhkosti povrchu betonu a povrchu OSB desky

V grafech je znázorněn počátek betonáže červenou svislou čarou. Senzory měřící vlhkost a teplotu betonu byly osazeny jeden den po betonáži.

Naměřené hodnoty relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu nejsou k dispozici, neboť došlo ke špatnému nastavení přístroje a po třech měsících měření se hodnoty začaly přepisovat.

### c) Nepřesnosti měření

V průběhu měření byly v sledované budově prováděny stavební úkony. Vlivem těchto úkonů mohlo dojít k občasnému ovlivnění naměřených hodnot. U naměřeného průběhu teploty můžeme sledovat časté výkyvy hodnot v řádu jednoho měření. To lze



vysvětlit tím, že senzory nesnímají přímo teplotu konstrukce, ale teplotu vzduchu u povrchu konstrukce. Pokud se kolem senzoru pohybuje osoba, nebo je v jeho blízkosti náhle otevřeno okno, dochází k rozproudění vzduchu v okolí senzoru a k naměření odlišné hodnoty. Po chvíli se proudění ustálí a naměřené hodnoty opět nabývají věrohodných hodnot.

Senzor pro měření hmotnostní vlhkosti stanovuje vlhkost v materiálu do 25 mm pod povrchem. Využívá dielektrickou konstantu vody. Pole o vysoké frekvenci prochází materiálem a generuje napětí, které je úměrné obsahu vlhkosti ve zkoušeném materiálu. Naměřené hodnoty signálu jsou poté přepočteny vnitřním softwarem dataloggeru na tři hodnoty hmotnostní vlhkosti pro tři typické materiály: zdivo, dřevo a karton. Pro vlhkost OSB desky byly využity přepočtené hodnoty pro dřevo. Předpokládáme, že odchylka od skutečné hmotnostní vlhkosti OSB desky není příliš velká, jelikož OSB deska je složena především ze dřeva.

Pro vlhkost betonu však software dataloggeru hodnoty neuvádí. Z tohoto důvodu byly použity hodnoty pro zdivo, protože struktura betonu je struktuře zdiva nejbližší. Zde tedy dochází k výraznější odchylce. Naměřené hodnoty se tedy mohou od skutečné vlhkosti lišit, ale trend naměřených hodnot je shodný.

Při analýze naměřených hmotnostních vlhkostí betonu lze tedy brát v úvahu pouze naměřený průběh vlhkostní křivky v čase, nikoliv naměřené hodnoty.

#### **d) Analýza naměřených hodnot**

Z naměřených hodnot jde vidět, že v době po betonáži dochází k poklesu teploty u povrchu OSB desky i betonu. V této době byla budova pravděpodobně větrána a teplota vlivem mísení vnitřního vzduchu s chladným vnějším vzduchem klesala až na hodnoty kolem 15 °C. Hmotnostní vlhkost betonu v tomto období prudce klesala a docházelo tak k odparu značného množství vody. Vlhkost OSB desky po tuto dobu zůstává neměnná. Zlom nastává ve 34. dni měření, kdy lze vidět prudký nárůst teploty a zároveň nárůst hmotnostní vlhkosti OSB desky. V tuto dobu bylo pravděpodobně zamezeno větrání budovy a vlhkost odpařená z betonové podlahy se začala hromadit u povrchu OSB desky. I během následujících dní byl sledován nárůst vlhkosti u povrchu OSB desky, přestože byla budova občas provětrávaná. V 51. dni pak dochází k prudkému nárůstu vlhkosti u povrchu OSB desky doprovázeného zvýšením teploty. Pravděpodobně tak bylo opět zamezeno



větrání. Tento nárůst vlhkosti je ovšem tak prudký, až skokový, že jej lze vysvětlit také jako nepřesnost měření, kdy mohlo dojít k posunu vlhkostního čidla a tím k naměření odlišných hodnot.

### 1.1.2 Shrnutí rizik spojených s vysycháním betonové podlahy do dřevostaveb

Největší riziko pro dřevěné konstrukce dřevostavby přináší vysychání roznášecí vrstvy podlahy, která je v přímém kontaktu s vnitřním prostředím. Může tak docházet k hromadění vlhkosti v dřevěných konstrukcích budovy a následné degradaci dřeva.

Tuto skutečnost potvrdily také výsledky z měření hmotnostní vlhkosti OSB desky v průběhu vysychání betonové podlahy na reálné stavbě. Je však patrné, že při dostatečném větrání a vytápění budovy lze hromadění vlhkosti ve dřevě zabránit.

## 1.2 Termíny a definice

Na počátku práce je nutné stanovit základní termíny, se kterými se bude pracovat. V tuzemském prostředí lze čerpat z technické normy ČSN 74 4505 Podlahy – společná ustanovení. Ta stanovuje základní termíny a definice:

„**Podlaha**: sestava podlahových vrstev (souvrství) uložených na nosném podkladu (např. stropu, upraveném podloží, nebo jiné nosné konstrukci) a zabudovaných podlahových prvků, dilatačních a pracovních spár, které společně zajišťují požadované funkční vlastnosti podlahy.“

„**Podlahový potěr, podlahová mazanina**: vrstva zhutněného materiálu, obvykle směs pojiva, vody a plniva s maximálním zrnem menším než 8 mm, nanesená na místě ve vhodné tloušťce.“ [8]

V této práci se budeme zabývat vrstvou podlahy, jež splňuje definici pro „**podlahový potěr, podlahová mazanina**“. Jedná se o roznášecí vrstvu, na kterou se obvykle přímo pokládá nášlapná vrstva, bez užití separační fólie. Je tak v přímém kontaktu s vnitřním prostředím budovy a odpar vody z této vrstvy může mít vliv na okolní konstrukce. V této práci budeme tuto vrstvu podlahy nazývat zjednodušeně „**betonová podlaha**“.



### 1.3 Cíl práce

Tato práce má za cíl provést případovou studii vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby a tím odpovědět na otázku, zda lze větráním a vytápěním budovy zkrátit dobu vysychání betonové podlahy a zamezit ukládání odpařené vody v dřevěných konstrukcích.

Pro tuto případovou studii je nutné nalézt optimální výpočtový software, který správně simuluje odpar vody z betonové podlahy do dřevostavby. Dostupné výpočtové software však dokáží simulovat pouze transport vody v určitém materiálu. S jejich pomocí tedy nelze zkoumat vliv vytápění a větrání budovy na proces vysychání. Z tohoto důvodu je vytvořen vlastní matematický model, který lze využít v případové studii.

Aby bylo ověřeno, že matematický model pracuje správně, je proveden experiment vysychání betonových vzorků a laboratorní měření jejich fyzikálních vlastností. Hodnoty naměřené v experimentu jsou poté porovnány s výsledky simulace v matematickém modelu. Tím je možné tento model validovat a kalibrovat.



## 2 Průzkum vlastních betonových směsí

V této kapitole je popsáno zhotovení vlastních betonových vzorků a stanovení jejich fyzikálních vlastností. Tyto betonové vzorky byly využity pro experiment vysychání vody z betonu. Tato část práce je dále zužitkována v kapitole 3.3 Validace matematického modelu.

### 2.1 Průzkum složení běžně užívaných betonových směsí

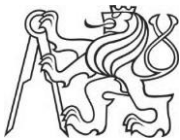
Před návrhem vlastních betonových směsí byl nejprve proveden průzkum užívaných směsí v tuzemském prostředí. Důvodem bylo, aby vlastní betonové vzorky reprezentovali skutečnou situaci při výstavbě dřevostaveb.

Betonová směs se skládá ze tří základních složek. Kameniva, cementu a záměsové vody. Často také bývá užíváno přísad, zejména plastifikátorů pro větší tekutost směsi při zachování malého vodního součinitele.

Jako zdroj informací pro návrh směsi posloužili norma ČSN 74 4505 Podlahy – Společná ustanovení [8] a veřejně dostupné informace výrobců cementových potěrů. Výrobci ani norma však neuvádí přesné složení směsi. Autor této práce proto kontaktoval řadu výrobců a realizačních firem cementových potěrů s žádostí o podrobnější informace o jejich směsích. Většina výrobců s ohledem na ochranu obchodního tajemství nemohla sdělit konkrétní informace. Zároveň platí, že složení směsi se řídí konkrétními podmínkami na stavbě a požadavky stavebníka.

Přesto produktový specialista Divize beton firmy Cemex, Ing. Daniel Šmíd, poskytl několik cenných informací [17]:

- *Výraznou roli při návrhu směsi hrají přísady a příměsi (například přísady ovlivňující vnitřní napětí vody, velikost a obsah mikropórů, pohyb vody ve směsi, redukci smršťování).*
- *Užívané kamenivo do cementových potěrů bývá frakce 0-4 mm a 4-8 mm.*
- *Vodní součinitel pro lité směsi bývá zpravidla hodnoty  $v = 0,6$ .*



Jako příklad složení betonové mazaniny lze uvést návrh uvedený v přednášce „Podlahy, Ing. Miloslava Popenkové, CSc.“ [5]:

- Těžené kamenivo frakce 0-4 mm	550 kg/m <sup>3</sup>
- Drcené kamenivo frakce 4-8 mm	184 kg/m <sup>3</sup>
Drcené kamenivo frakce 8-16 mm	936 kg/m <sup>3</sup>
- Cement třídy I 32,5	370 kg/m <sup>3</sup>
- Záměsová voda ( $v=0,42$ )	156 lit/m <sup>3</sup>
- Ztekucovací přísada	4,5 lit/m <sup>3</sup>

Součtem všech složek betonu dostáváme objemovou hmotnost čerstvé betonové směsi 2200 kg/m<sup>3</sup>. Hmotnostní poměr celé směsi ku kamenivu je 1: 0,73. Množství cementu a záměsové vody je řízeno zvoleným vodním součinitelem. Tyto údaje byly využity pro návrh vlastních betonových směsí.

## 2.2 Návrh směsí

Při návrhu vlastních betonových směsí byl nejprve stanoven vodní součinitel. Tedy hmotnostní poměr vody a cementu v mokré směsi. Množství kameniva je řízeno hmotnostním poměrem celkové směsi ku kamenivu 1 : 0,73, který je uveden v kapitole 2.1.

Pro potřeby této práce nebyly použity žádné přísady zlepšující tekutost směsi. Důvodem je neznámý vliv těchto přísad na fyzikální vlastnosti betonu. Aby byly vzorky reprezentativní, byl návrh směsi proveden bez těchto přísad.

Byly navrženy tři betonové směsi, které se liší užitým vodním součinitelem. Betonová směs I. je navržena s minimálním vodním součinitelem, který se pohybuje na hranici zpracovatelnosti mokré směsi bez pomoci plastifikátorů. Naopak směs III. je navržena s vysokou hodnotou vodního součinitele, tedy se jedná o směs velmi tekutou.

Poté bylo stanoveno množství kameniva z hmotnostního poměru celkové směsi ku kamenivu 1: 0,73. Celková hmotnost směsí, s ohledem na kapacitu dostupné míchačky, činí 3 kg, resp. 2,45 kg u směsi III. Hmotnost kameniva tedy činí 2,19 kg, resp. 1,79 kg u směsi III.



### 2.2.1 Směs I.

První směs je navržena s vodním součinitelem  $v = 0,5$  (–). Jedná se o „nejsušší“ směs ze všech navržených. Z navrženého vodního součinitele je dále dopočítána hmotnost vody na  $0,30 \text{ kg}$  a hmotnost cementu  $0,54 \text{ kg}$ . Složení znázorňuje Tabulka 2.2.1-1 níže.

Směs I. ( $v = 0,5$ )	cement	voda	kamenivo	Celkem
hmotnost (kg)	0,54	0,27	2,19	3,00
hmotnostní podíl (% hm.)	18,0	9,0	73,1	-

Tabulka 2.2.1-1: Složení betonové směsi I

### 2.2.2 Směs II.

Tato směs je navržena s vodním součinitelem  $v = 0,7$  (–). Jedná se tedy o „středně suchou“ směs. Celková hmotnost směsi činí  $3 \text{ kg}$ . Z navrženého vodního součinitele je dále dopočítána hmotnost vody na  $0,33 \text{ kg}$  a hmotnost cementu  $0,48 \text{ kg}$ . Složení znázorňuje Tabulka 2.2.2-1 níže.

Směs II. ( $v = 0,7$ )	cement	voda	kamenivo	Celkem
hmotnost (kg)	0,48	0,33	2,19	3,00
hmotnostní podíl (% hm.)	15,9	11,1	73,1	-

Tabulka 2.2.2-1: Složení betonové směsi II

### 2.2.3 Směs III.

Tato směs je navržena s vodním součinitelem  $v = 1,1$  (–). Jedná se tedy o „nejvlhčí“ směs. Celková hmotnost směsi činí  $2,45 \text{ kg}$ . Z navrženého vodního součinitele je dále dopočítána hmotnost vody na  $0,35 \text{ kg}$  a hmotnost cementu  $0,31 \text{ kg}$ . Složení znázorňuje Tabulka 2.2.3-1 níže.

Směs III. ( $v = 1,1$ )	cement	voda	kamenivo	Celkem
hmotnost (kg)	0,31	0,35	1,79	2,45
hmotnostní podíl (% hm.)	12,8	14,1	73,0	-

Tabulka 2.2.3-1: Složení betonové směsi III

## 2.3 Laboratorní měření

Betonáž vzorků a následné laboratorní měření bylo provedeno v laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (dále jen UCEEB)





### 2.3.1 Provádění betonových vzorků

Betonáž byla provedena dne 9. 8. 2017 mezi 12 a 14 hodinou. Bylo užito kamenivo složené z jemného písku frakce 0 – 2 mm a kameniva frakce 4 – 8 mm v objemovém poměru 1 : 4. Dále bylo užito cementu dostupného v laboratoři a vody z vodovodního řádu.

Po smíchání suché směsi každého betonového vzorku a řádném promísení bylo přidáno navržené množství vody. Celá směs poté byla míchána po dobu minimálně 120 s v motorové míchačce.

Mezitím byly připraveny bednicí formy. Užity byly celkem 2 druhy forem pro každou směs. První forma pro zhotovení betonových kvádrů o rozměrech 4x4x6 cm. Originálně se tato forma užívá pro kvádry 4x4x16 cm. Proto byl do středu každé formy vložen kvádr z XPS, čímž vzniklo bednění o potřebných rozměrech. Vzorky z těchto forem byly užity pro experiment vysychání a pro zjištění sorpční izotermy. Druhá užitá forma sloužila pro betonáž vzorků k měření faktoru difúzního odporu. Jedná se o formu ve tvaru plochého válce průměru 12 cm a výšce přibližně 2 cm. Před vylitím betonové směsi do forem byly formy vymazány pro snížení přilnavosti betonu k formě. Celý proces betonáže je zdokumentován, viz 1. Příloha: Fotodokumentace provádění betonových vzorků.

Den po betonáži 10. 8. 2017 mezi 17 a 18 hodinou byly z forem o rozměrech 4x4x6 cm odbedněny tři vzorky z každé směsi, celkem tedy devět vzorků. U těchto byl dále sledován proces vysychání dalších 55 dní. Ten je podrobněji popsán v kapitole 2.4 Experiment vysychání betonových směsí. Ostatní vzorky byly ponechány další 4 dny v bednění a posléze byly zkoumány jejich fyzikální vlastnosti.

### 2.3.2 Měření objemové hmotnosti suchého betonu

Pro měření objemové hmotnosti suchých vzorků bylo užito takzvané absolutní metody, tedy odstranění vlhkosti z testovaných vzorků. Byly využity vzorky tvaru kvádrů o rozměrech 4x4x6 cm. Jelikož tyto vzorky byly nejprve využity pro experiment vysychání jednotlivých betonových směsí, byly obaleny bitumenovou páskou z pěti stran (viz kapitola 2.4 Experiment vysychání betonových směsí). Po ukončení tohoto experimentu byly vzorky vysušeny. Sušení v peci nebylo možné, jelikož už při teplotě 40 °C bylo sledováno měknutí bitumenové pásky. Bylo tedy užito pomalejší metody, sušení v exsikátoru s vysoušecím silica gelem (viz 2. Příloha: Fotodokumentace sušení betonových vzorků). Vzorky zde byly ponechány 41 dní. Po této době byl sledován procentuální úbytek



hmotnosti vzorku maximálně 0,014 % za 24 hodin. Vzorky tedy byly považovány za vysušené a byla zaznamenána jejich váha.

Váha vysušeného vzorku se však skládá z váhy samotného betonu a váhy bitumenové pásky. Pro zjištění objemové hmotnosti je zásadní znát hmotnost samotného betonového vzorku, bez pásky. Při pokusu o odebrání pásky ze vzorku však docházelo k narušení betonové struktury a k ulpívání pásky v pórech betonu. Váha betonového vzorku tedy byla zjištěna nepřímou metodou, odečtením váhy bitumenové pásky od váhy celého vzorku.

Váha pásky byla stanovena pomocí tří dalších betonových kvádrů o shodných rozměrech, na které byla umístěna stejná bitumenová páska. Poté byla páska odejmuta a zvážena. Ze tří vzorků byl vypočten aritmetický průměr, viz Tabulka 2.3.2-1.

Betonový vzorek	1d	1e	2d
Hmotnost bitumen. p. (g)	15,7	16,4	15,5
<b>Průměrná hmotnost (g)</b>	<b>15,8</b>		
Odchylka (%)	-0,9	3,3	-2,4

Tabulka 2.3.2-1: Hmotnost bitumenové pásky a stanovení odchylky naměřených hodnota

Od zjištěných hmotností vzorků byla odečtena hmotnost bitumenové pásky a tím byla zjištěna hmotnost jednotlivých betonových kvádrů  $m_d$  (kg), jak popisuje Tabulka 2.3.2-2. Pro zhotovení vzorků bylo využito jednotného rozměru forem  $4 \times 4 \times 6$  cm. Objem všech betonových kvádrů je tedy shodný a činí  $96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ . Objemová hmotnost je zjištěna ze vztahu:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_v} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$



Kde  $\rho_d$  ( $kg/m^3$ ) je objemová hmotnost suchého betonového vzorku,  $m_d$  ( $kg$ ) je hmotnost tohoto vzorku a  $V_v$  ( $m^3$ ) jeho objem. Výsledné hodnoty hmotností a objemových hmotností jednotlivých vzorků popisuje Tabulka 2.3.2-2.

Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$m_d$ (kg)	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20	0,18	0,18	0,18
$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	1 933	1 971	2 072	2 082	2 030	2 125	1 893	1 913	1 829
$\rho_{d,průměr}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1992			2079			1878		
$\pm$ (kg/m <sup>3</sup> )	33			34			32		

Tabulka 2.3.2-2: Hmotnosti a objemové hmotnosti suchých betonových vzorků

Hmotnost bitumenové pásky byla stanovena nepřímou metodou. Tabulka 2.3.2-1 ukazuje, že odchylky hmotností bitumenové pásky na jednotlivých vzorcích se od střední hodnoty liší maximálně o 3,3 %. Zohledníme tedy nepřesnost měření a budeme dále počítat s odchylkou bitumenové pásky 1 g. Vážení betonových vzorků bylo provedeno na vahách s přesností  $d = 0,001 g$  a při měření byla váha se vzorkem zakryta plexisklem, aby vážení nebylo ovlivněno prouděním vzduchu v laboratoři. Odchylka naměřených hodnot by tedy neměla být větší než 0,01 g. Objem vzorků byl převzat z objemu bednicí formy. Při tuhnutí betonu však došlo ke smrštění a v rozích forem nemusel být beton dostatečně ztuhnut. Odchylka objemu vzorku tedy může být větší, o hodnotě  $1 \cdot 10^{-6} m^3$ . Z uvedených odchylek byla stanovena maximální a minimální hodnota objemové hmotnosti suchého betonu a tím zjištěna nepřesnost měření, kterou rovněž uvádí Tabulka 2.3.2-2.

### 2.3.3 Obsah vody ve vlhkém vzorku po vybetonování, odhad pórovitosti

Pro stanovení obsahu vody ve vzorku po vybetonování je nutné znát hmotnost vlhkého vzorku po vybetonování  $m_0$  ( $g$ ) a hmotnost suchého vzorku  $m_d$  ( $g$ ). Hmotnost vody v jednotlivých vzorcích  $m_{w,0}$  ( $g$ ) zjistíme odečtením hmotnosti suchého vzorku od hmotnosti vlhkého vzorku:

$$m_{w,0} = m_0 - m_d \quad (g) \quad (2)$$

Z této hodnoty lze odhadnout otevřenou pórovitost materiálu. Vzorky byly váženy na počátku vysychání, den po betonáži. Předpokládejme tedy, že v době vážení byly



otevřené póry nasyceny vodou. Známe-li hustotu vody  $\rho_w$  ( $kg/m^3$ ), lze stanovit objem vody  $V_w$  ( $m^3$ ) v otevřených pórech vztahem:

$$V_w = \frac{m_{w,0}}{\rho_w} \quad (m^3) \quad (3)$$

Vzorky jsou velikosti  $4x4x6cm$ , jejich objem tedy činí  $V_v = 96 \cdot 10^6 m^3$ . Otevřenou pórovitost každého vzorku  $\phi_o$  (-) stanovíme jako podíl objemu pórů a objemu vzorku:

$$\phi_o = \frac{V_w}{V_v} \quad (-) \quad (4)$$

Výsledné hodnoty shrnuje Tabulka 2.3.3-1.

Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$m_o$ (g)	208	213	221	223	219	228	211	213	205
$m_d$ (g)	201	205	215	216	211	220	198	200	191
$m_{w,0}$ (g)	7	8	7	8	8	8	13	13	14
$m_{w,0,průměrné}$ (g)	7			8			13		
$\Phi_o$ (-)	0,069	0,079	0,068	0,080	0,088	0,080	0,139	0,138	0,143
$\Phi_{o,průměr}$ (-)	0,07			0,08			0,14		

Tabulka 2.3.3-1: Hmotnost vody ve vlhkých vzorcích po vybetonování, odhad otevřené pórovitosti

Užitá metoda stanovení otevřené pórovitosti předpokládá, že veškeré otevřené póry byly v době vážení nasyceny vodou a že beton neobsahoval jinou vlhkost než vodu v pórovité struktuře. V čerstvé betonové směsi je však obsaženo značné množství záměšové vody, která se odpařuje z povrchu betonu. Ta může způsobit značnou nepřesnost stanovení otevřené pórovitosti. Jedná se tedy pouze o odhad otevřené pórovitosti jednotlivých vzorků.

### 2.3.4 Měření sorpční izotermy

Pro měření sorpční izotermy bylo třeba sledovat množství vody, které pojme betonový vzorek v závislosti na relativní vlhkosti okolního vzduchu. Bylo proto užito celkem 4 exsikátorů. Do každého byly vloženy plastové vaničky se solným koncentrátem. Tím bylo dosaženo přesné hodnoty relativní vlhkosti v každém exsikátoru.

Byly užity koncentráty solí  $K_2SO_4$ ,  $NaBr$ ,  $LiCl$ ,  $KCl$  a  $CH_3COOK$ . Nasycený solný roztok v každém exsikátoru udržuje relativní vlhkost vzduchu na konstantní hodnotě, viz Tabulka 2.3.4-1.



Exsikátor č.	1	2	3	4
Nasycený roztok soli	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	KCl	NaBr	CH <sub>3</sub> COOK
RH (%)	97,4	85,1	58,2	23,1

Tabulka 2.3.4-1: Přehled relativních vlhkostí okolního vzduchu u nasycených roztoků soli

Vzorky pro měření sorpce byly odebrány z betonových kvádrů o rozměru 4x4x6 cm. Z každého kvádru bylo vydroleno pomocí zednického kladiva patřičné množství drobné betonové drti. Tato drť byla uložena do 4 hliníkových mističek tak, aby se v každé mističce nacházelo přibližně 10 g betonové drti. Z každé betonové směsi vznikly 4 vzorky, celkem tedy 12 vzorků. Každá mistička byla poznačena a vložena do příslušného exsikátoru, jak popisuje Tabulka 2.3.4-2.

V exsikátorech byla kontrolována rovnovážná relativní vlhkost pomocí datalogerů s přesností měření relativní vlhkosti na 5 procentních bodů. Přibližně po měsíci měření bylo možné konstatovat, že hmotnost vzorků v každém exsikátoru je rovnovážná. Hmotnosti znázorňuje Tabulka 2.3.4-2. Dále byly vzorky podrobeny vysušení pro zjištění hmotnosti suchého vzorku.

Sušení bylo prováděno v peci při teplotě 105 °C. Přibližně po 3 týdnech již hmotnost vzorků nekolísala a bylo tedy možné zaznamenat hmotnosti suchých vzorků a tím vypočítat hmotnost kapaliny v jednotlivých vzorcích dle vztahu:

$$m_k = m_w - m_d \quad (g) \quad (5)$$

Kde  $m_k$  (g) je hmotnost kapaliny ve vzorku,  $m_w$  (g) je ustálená hmotnost vlhkého vzorku a  $m_d$  (g) hmotnost suchého vzorku.

Dále bylo možné stanovit hmotnostní vlhkosti jednotlivých vzorků dle vztahu:

$$w_h = \frac{m_k}{m_d} 100 \quad (\% \text{ hm.}) \quad (6)$$

Kde  $w_h$  (% hm.) je ustálená rovnovážná vlhkost. Vypočtené hodnoty znázorňuje Tabulka 2.3.4-2.

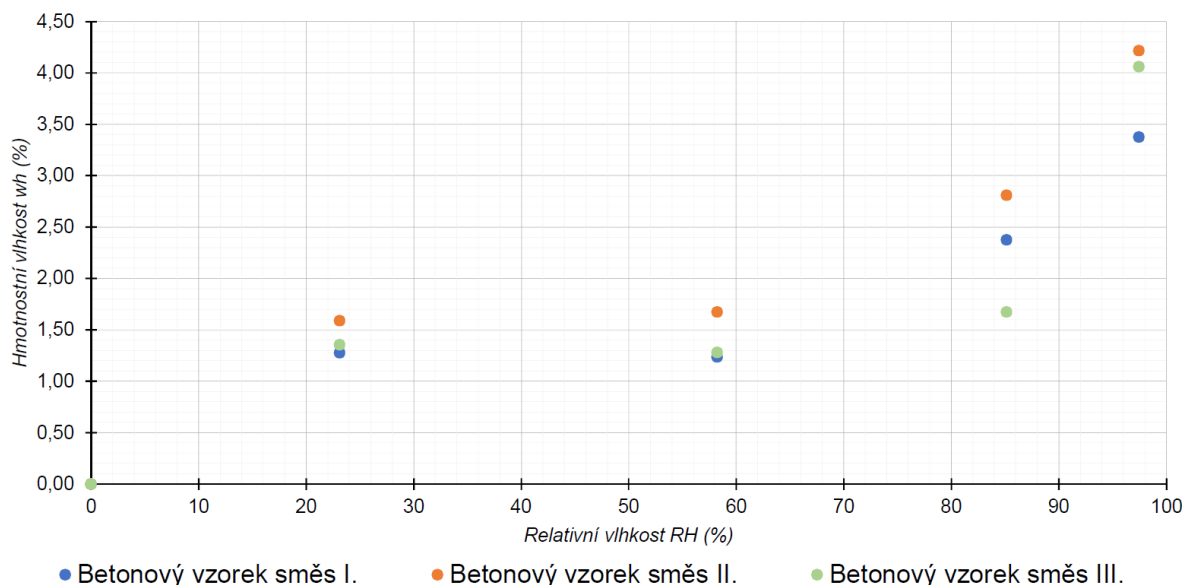


Vzor.	Směs bet.	Exsik.	RH (%)	$m_w$ (g)	$m_d$ (g)	$m_k$ (g)	$w_h$ (%)	$\pm$ (%)
1	Směs I.	1	97,4	10,1	9,8	0,3	3,4	0,2
2	Směs II.	1	97,4	10,2	9,8	0,4	4,2	0,2
3	Směs III.	1	97,4	10,4	10,0	0,4	4,1	0,2
4	Směs I.	2	85,1	10,0	9,8	0,2	2,4	0,2
5	Směs II.	2	85,1	9,7	9,4	0,3	2,8	0,2
6	Směs III.	2	85,1	10,9	10,8	0,2	1,7	0,2
7	Směs I.	3	58,2	10,1	10,0	0,1	1,2	0,2
8	Směs II.	3	58,2	10,3	10,1	0,2	1,7	0,2
9	Směs III.	3	58,2	9,6	9,4	0,1	1,3	0,2
10	Směs I.	4	23,1	10,2	10,1	0,1	1,3	0,2
11	Směs II.	4	23,1	10,2	10,0	0,2	1,6	0,2
12	Směs III.	4	23,1	9,9	9,8	0,1	1,4	0,2

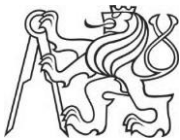
Tabulka 2.3.4-2: Hmotnosti jednotlivých vzorků, vypočtené hmotnostní vlhkosti

Vážení vzorků bylo provedeno na vahách s přesností  $d = 0,001 \text{ g}$  a při měření byla váha se vzorkem zakryta plexisklem, aby vážení nebylo ovlivněno prouděním vzduchu v laboratoři. Odchylka naměřených hodnot by tedy neměla být větší než  $0,01 \text{ g}$ . Z této odchylky byla stanovena maximální a minimální hodnota hmotnostní vlhkosti, kterou rovněž uvádí Tabulka 2.3.4-2.

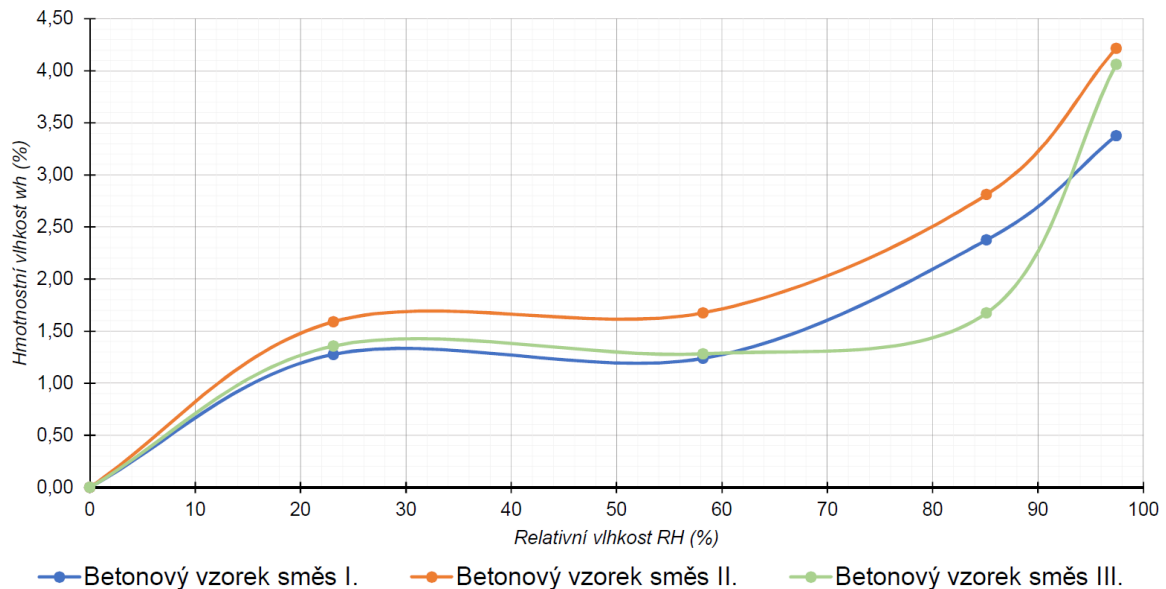
Z vypočtených hodnot byl sestrojen Graf 2.3.4-1. Na horizontální ose jsou vynášeny hmotnostní vlhkosti jednotlivých materiálů. Na vertikální ose je znázorněna příslušná relativní vlhkost okolního vzduchu. Pro každý materiál jsme tímto sestrojili 4 body sorpční izotermy.



Graf 2.3.4-1: Hmotnostní vlhkosti jednotlivých betonových směsí



Pro sestavení celkového průběhu sorpční izotermy by bylo třeba více naměřených hodnot. Pro potřeby této práce však můžeme čtyři naměřené hmotnostní vlhkosti proložit křivkou a dostáváme odhadované sorpční izotermy tří betonových směsí. Znázorňuje je Graf 2.3.4-2.



Graf 2.3.4-2: Odhadnutý průběh sorpční izotermy jednotlivých betonových směsí

### 2.3.5 Měření faktoru difuzního odporu

Pro zjištění faktoru difuzního odporu vlastních betonových směsí bylo užito tzv. miskové metody. Ta spočívá v tom, že je na dno misky vložen nasycený roztok soli. K horní hraně misky je umístěn sledovaný vzorek a po obvodu utěsněn. Vodní pára tak nemůže z misky, respektive do misky, unikat jinudy než přes sledovaný vzorek. Díky nasycenému solnému roztoku je zároveň uvnitř misky udržována konstantní relativní vlhkost. Misky se vzorky jsou poté vloženy do exsikátorů, ve kterých je rovněž udržována konstantní relativní vlhkost. Obvykle se tak činí také pomocí nasyceného roztoku soli. Pokud je relativní vlhkost v misce rozdílná oproti relativní vlhkosti v exsikátoru, dochází vlivem rozdílných koncentrací vodních par k difuzi vodní páry skrz sledovaný vzorek. Postupným vážením misky je tak sledován přírůstek, respektive úbytek hmotnosti vody v misce.

Pro toto měření byly využity betonové vzorky tvaru plochého válce o průměru podstavy 12 cm a výšce přibližně 2 cm. Tyto vzorky byly vloženy do misek z difuzně nepropustného materiálu. Na dno misek byl umístěn nasycený solný roztok  $NaBr$ , který uvnitř misky bude udržovat stálou relativní vlhkost 58,20 %. Po celém obvodu vzorků byl



nanesen silikonový, difuzně nepropustný tmel tak, aby vodní pára z misky, respektive do misky, mohla prostupovat pouze skrz vzorek. Tímto způsobem bylo připraveno celkem 9 betonových vzorků, po třech z každé betonové směsi. Misky byly označeny a vloženy do exsikátoru. Pro první měření byl užit exsikátor s nasyceným roztokem soli  $K_2SO_4$ , čímž bylo docíleno konstantní relativní vlhkosti v exsikátoru 97,42 %. Vodní pára tedy difundovala směrem do misek a byl tedy sledován přírůstek jejich hmotnosti. Střední relativní vlhkost, tedy průměrná relativní vlhkost mezi prostředím v misce a prostředím v exsikátoru činila 77,81 % (viz Tabulka 2.3.5-1). Experiment byl započat 12. září 2017. V prvních dnech měření dosahovala první derivace hmotnosti misek v čase poměrně velkých hodnot. Vodní pára tedy přes betonový vzorek difundovala velkou rychlostí. Tol ze vysvětlit tím, že docházelo k postupné adsorbci, popřípadě k tvorbě kapilární kondenzaci v pórovité struktuře betonu. Vodní vlhkost se tedy ukládala do betonového vzorku a do prostředí misky pronikala jen částečně. Derivace hmotnosti v čase se postupně snižovala, až po přibližně 12 dnech začala nabývat konstantní hodnoty. 10. října, po 29 dnech měření bylo konstatováno, že změna hmotnosti v čase je konstantní a měření bylo ukončeno. Poslední dvě naměřené hodnoty byly dále použity k výpočtu faktoru difuzního odporu.

Po ukončení experimentu v prvním exsikátoru byly misky postoupeny druhému měření v exsikátoru s konstantní relativní vlhkostí 11,30 %. Ta byla udržovaná pomocí nasyceného roztoku soli  $LiCl$ . Vodní pára tedy difundovala směrem ze vzorku, tedy opačně, než tomu bylo v předchozím měření. Střední relativní vlhkost činila 34,75 % (viz Tabulka 2.3.5-1). První dny měření byla opět sledována vysoká změna hmotnosti vzorků v čase, kterou způsobuje desorpce vlhkosti z materiálu. Po 14 dnech měření byla změna hmotnosti v čase mírnější. Po 29 dnech měření byla změna hmotnosti v čase považovaná za konstantní a měření bylo ukončeno. Poslední dvě naměřené hodnoty hmotnosti misky byly dále užity k výpočtu faktoru difuzního odporu jednotlivých vzorků.





Exsikátor č.	1	2
Nasyčený roztok soli v exsik.	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	LiCl
RH v exsik. (%)	97,4	11,3
Nasyčený roztok soli v misce	NaBr	NaBr
RH v misce (%)	58,2	58,2
RH střední (%)	77,8	34,8
Parc. tlak v. p. v exsikátoru P <sub>exs</sub> (Pa)	2 736,5	317,4
Parc. tlak v. p. v misce P <sub>cup</sub> (Pa)	1 634,8	1 634,8
Rozdíl parc. Tlaků v. p. Δp <sub>p</sub> (Pa)	1 101,7	1 317,4
Termodynamická teplota T (K)	295,6	296,5

Tabulka 2.3.5-1: Parametry vzduchu v exsikátorech a v miskách

Faktor difúzního odporu  $\mu$  je bezrozměrná veličina, jež popisuje míru nepropustnosti materiálu vůči vodní páře. Nabývá hodnot od 1 do nekonečna. Přičemž  $\mu = 1$  dosahuje vzduch. Dá se tedy říct, že faktor difúzního odporu popisuje, kolikrát je daný materiál propustnější vůči vodní páře než vzduch.

Spočte se jako podíl součinitele difuze daného materiálu  $D$  ( $m^2/s$ ) a součinitele difuze vzduchu  $D_a = (m^2/s)$ .

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad (-) \quad (7)$$

Přičemž součinitel difuze vzduchu je roven  $D_a = 2,3 \cdot 10^{-5} m^2/s$  a Součinitel difuze vzorku vychází ze vzorce:

$$D = \frac{\delta R T}{M} \quad (m^2/s) \quad (8)$$

Kde  $\delta$  ( $s$ ) je součinitel difúzní vodivosti,  $R$  je univerzální plynová konstanta, která je rovna  $8,314 J/(mol.K)$ ,  $T$  ( $K$ ) je termodynamická teplota a  $M$  molární hmotnost vody, která je rovna  $0,018 Kg/mol$ .

Součinitel difúzní vodivosti se spočte jako:

$$\delta = \frac{\Delta m d}{S \tau \Delta p} \quad (s) \quad (9)$$

Kde  $\Delta m$  ( $kg$ ) je hmotnost vodní páry, jež prošla skrz vzorek za časové období  $\tau$  ( $s$ ),  $d$  je tloušťka vzorku, která činí  $2 mm$ ,  $S$  je měrná plocha vzorku jež je rovna  $0,011 m^2$  a  $\Delta p$  ( $Pa$ ) je rozdíl parciálních tlaků vodní páry v exsikátoru a v misce, viz Tabulka 2.3.5-1.



Výsledné hodnoty faktoru difúzního odporu shrnuje Tabulka 2.3.5-2.

Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
<b>Exsik. 1 RH = 77,8 %</b>									
Faktor dif.odp. $\mu$ (-)	33,3	35,8	30,4	26,4	33,2	34,1	22,2	20,1	24,5
<b>Průměrný <math>\mu_{\text{betonu}}</math> (-)</b>	<b>33</b>			<b>31</b>			<b>22</b>		
Odchylka (%)	0,4	8,0	-8,3	-15,4	6,2	9,2	-0,3	-9,7	10,0
<b>Exsik. 2 RH = 34,8 %</b>									
Faktor dif.odp. $\mu$ (-)	120,6	123,2	109,6	113,5	121,6	122,2	79,0	80,7	81,8
<b>Průměrný <math>\mu_{\text{betonu}}</math> (-)</b>	<b>118</b>			<b>119</b>			<b>80</b>		
Odchylka (%)	2,4	4,6	-6,9	-4,7	2,1	2,6	-1,9	0,2	1,7

Tabulka 2.3.5-2: Výpočet faktoru difúzního odporu a odchylky měření v exsikátorech

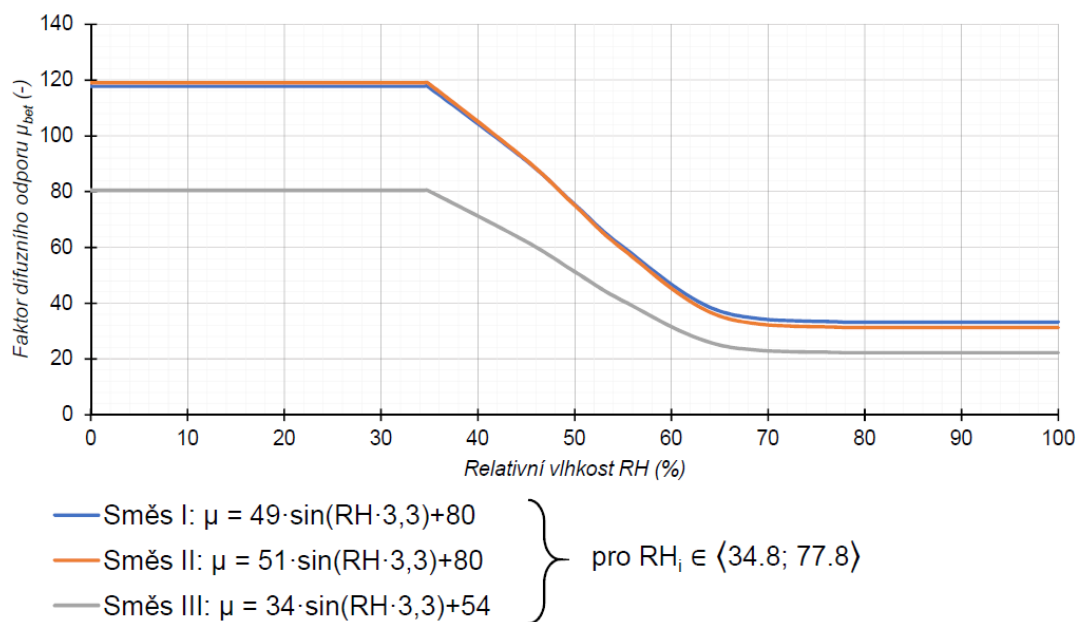
Protože z každé betonové směsi byly testovány 3 vzorky, je nakonec potřeba zanalyzovat odchylky naměřených hodnot mezi vzorky. V předposledním řádku tabulky je vypočten aritmetický průměr faktoru difúzního odporu pro každou betonovou směs. V posledním řádku je pak vypočtena odchylka jednotlivých vzorků od této průměrné hodnoty. Jde vidět, že při prvním měření se hodnoty faktoru difúzního odporu jednotlivých vzorků liší až o 15,41 %. Nejedná se o zásadní odchylky a mohou být způsobeny tím, že betonové vzorky jsou nehomogenní. Zejména zrna kameniva mohou způsobovat odlišné vlastnosti jednotlivých vzorků. Odchylky však mohli vzniknout také v průběhu experimentu. V exsikátoru byla udržována konstantní relativní vlhkost vzduchu 97,42 %. V kombinaci s tím, že v tomto ročním období venkovní teploty dosahovali nízkých hodnot, došlo pravděpodobně k ochlazení obvodové stěny laboratoře. Přesto, že exsikátory byly umístěny přibližně 30 cm od této stěny, došlo pravděpodobně k ochlazení povrchu exsikátoru a vlivem vysoké relativní vlhkosti v exsikátoru byla sledována povrchová kondenzace vodní páry v horním rohu exsikátoru. Při měřeních, které probíhaly přibližně po třech dnech však nebylo sledováno skapávání vody na vzorky. Přesto je možné, že tato skutečnost ovlivnila měření.

Z tabulky jde vidět, že při druhém měření jsou odchylky faktoru difúzního odporu jednotlivých betonových směsí menší. Maximální odchylka činí 6,94 %.

Z naměřených hodnot lze také vidět, že při druhém měření jsou hodnoty faktoru difúzního odporu podstatně vyšší než při prvním. Vyplývá to ze střední relativní vlhkosti vzduchu, která v prvním měření činila 77,81 % a při měření druhém 34,75 %. Faktor difúzního odporu je tudíž závislý na relativní vlhkosti vzduchu, přičemž s klesající relativní



vlhkostí stoupá faktor difúzního odporu a materiál se tak stává méně propustným vůči vodní páře. Pro potřeby této práce je potřeba odhadnout závislost faktoru difúzního odporu na relativní vlhkosti. Naměřenými hodnotami byla proložena křivka. Byla použita sinusoida v obecném tvaru  $\mu = a \cdot \sin(RH_i \cdot k) + b$ . Přičemž  $k, a, b$  jsou neznámé. K dispozici máme dva body z měření faktoru difúzního odporu. Těmito body musí křivka procházet. Máme tedy soustavu dvou lineárních rovnic o třech neznámých. Z neznámé  $k$  byl vytvořen parametr a rovnice byla řešena pro neznámé  $a$  a  $b$ . Následně byl zkoumán průběh křivky v závislosti na parametru  $k$ . Víme, že faktor difúzního odporu nedosahuje hodnot menších než  $\mu = 1$  (–) a zároveň víme, že na intervalu  $RH_i \in \langle 0; 100 \rangle$  má křivka klesající trend. Byl nalezen parametr  $k = 3,7$ , který odpovídá těmto požadavkům. Tento průběh faktoru difúzního odporu byl užit pouze mezi naměřenými hodnotami, tedy na intervalu  $RH_i \in \langle 34,8; 77,8 \rangle$ . Mimo tento interval byla křivka nahrazena konstantní funkcí. Sorpční izotermu jednotlivých betonových směsí znázorňuje Graf 2.3.5-1.



Graf 2.3.5-1: Odhad závislosti faktoru difúzního odporu betonových směsí na střední relativní vlhkosti

### 2.3.6 Shrnutí naměřených hodnot

Byly zhotoveny betonové vzorky ze tří různých betonových směsí. Parametrem, jež řídil návrh těchto směsí byl vodní součinitel  $v$  (–), který se pohyboval v rozmezí hodnot 0,5 (–) až 1,1 (–). Pro každou betonovou směs byla zjištěna objemová hmotnost suchého vzorku  $\rho_d$  ( $kg/m^3$ ), faktor difúzního odporu  $\mu$  (–), ustálená hmotnostní vlhkost  $w_h$  (%) pro



čtyři relativní vlhkosti okolního vzduchu  $RH$  (%) a byla odhadnuta otevřená pórovitost  $\phi_o$  (-). Veškeré hodnoty shrnuje následující Tabulka 2.3.6-1.

Naměřené hodnoty	$v$ (-)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Phi_o$ (-)	$w_h$ (%) pro $RH$ rovno:				$\mu$ (-) pro $RH$ rovno:	
				23.1%	58.2%	85.1%	97.4%	34.8%	77.8%
Směs I	0.5	1992	0.07	1.28	1.24	2.38	3.38	118	33
Směs II	0.7	2079	0.08	1.59	1.68	2.81	4.22	119	31
Směs II	1.1	1878	0.14	1.36	1.28	1.67	4.06	80	22

Tabulka 2.3.6-1: Naměřené vlastnosti jednotlivých betonových směsí

## 2.4 Experiment vysychání betonových směsí

Po zhotovení betonových vzorků byl na devíti z nich proveden experiment vysychání za účelem zjištění průběhu hmotnosti vody v jednotlivých betonových směsích. Data z tohoto experimentu budou dále využita v kapitole 3.3 Validace matematického modelu pro srovnání výstupů z matematického modelu s naměřenými hodnotami. Jedná se tedy o podstatnou část této práce, jež poslouží ke kalibraci matematického modelu, a odhadu jeho přesnosti.

Den po vylití betonových směsí do forem o rozměru  $4 \times 4 \times 6$  cm, byla betonová směs sledována jako dostatečně pevná po vynětí z formy. Bylo tak učiněno 10. září.

Jednotlivé betonové vzorky reprezentují vysychání betonové vrstvy o mocnosti 6 cm. Pokud uvažujeme, že se jedná o vnitřní segment betonové vrstvy, tak bude transport vlhkosti převážně jednorozměrný, a to ve směru kolmém k povrchu betonové vrstvy. Praxe na reálných stavbách, kdy se pod betonovou mazaninu, či cementové potěry umisťuje separační fólie s vysokým faktorem difúzního odporu navíc zamezuje betonové vrstvě vysychat do spodní konstrukce stavby. Jediná plocha, přes kterou probíhá transport vlhkosti je tedy horní plocha betonové vrstvy, která je v kontaktu s vnitřním prostředím stavby.

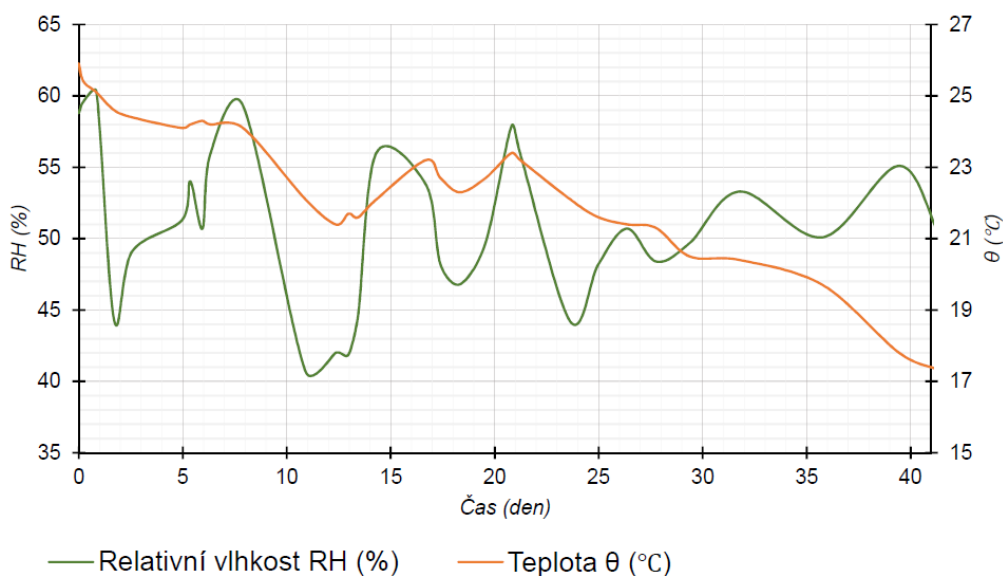
Cílem experimentu vysychání je, aby v největší možné míře reprezentoval vysychání segmentu betonové podlahy na reálné stavbě. Z tohoto důvodu je potřeba docílit toho, aby k transportu vody ze vzorku docházelo rovněž jen přes jednu stranu vzorku o rozměru  $4 \times 4$  cm. Ostatních pět stran vzorku bylo tedy zakryto bitumenovou páskou s vysokým difúzním odporem. Bylo dbáno na to, aby rohy a hrany vzorku byly řádně překryty páskou a nedošlo k narušení, či natržení pásky.



### 2.4.1 Okrajové podmínky

Vzorky byly zváženy a byla zaznamenána hmotnost na počátku experimentu, jeden den po vylití betonové směsi do forem. Poté byly vzorky převezeny z laboratoře v UCEEB v Praze do bytu autora této práce. Zde byly umístěny ve skladu tak, aby strana vzorků, jež nebyla zakryta bitumenovou páskou směřovala ke stropu místnosti. Jednalo se o místnost uvnitř bytové dispozice, s větracím otvorem do světlíku bytu. Místnost byla nepřetržitě zavřená a vzorky byly umístěny do polic tak, aby bylo zamezeno nežádoucímu proudění vzduchu okolo vzorků, což by mohlo mít vliv na proces vysychání. Po celou dobu měření nepřišly vzorky do kontaktu s přímým slunečním světlem.

V místnosti byl po celou dobu měření osazen temperature-humidity logger, jež zaznamenával teplotu a vlhkost vzduchu. Hodnoty znázorňuje graf Graf 2.4.1-1.



Graf 2.4.1-1: Relativní vlhkost a teplota vzduchu v průběhu experimentu

### 2.4.2 Naměřené hodnoty

Vzorky byly v průběhu vysychání postupně váženy. Z počátku jednou až dvakrát denně, jelikož v prvních dnech tuhnutí betonové směsi dochází k vypařování největšího množství vody. Po pěti dnech bylo měřeno přibližně jednou denně. Po 41 dnech byl úbytek hmotnosti vzorků přibližně 0,05 g za den. Jedná se o velmi malou hodnotu. Proto bylo konstatováno, že vysychání betonové směsi je již v konečné fázi, kdy je úbytek hmotnosti na hranici nepřesnosti váhy. Experiment byl tedy ukončen. Naměřené hodnoty znázorňuje



Tabulka 2.4.2-1, kde  $m_{w,0}$  (g) je hmotnost vzorků na počátku vážení,  $m_{w,end}$  (g) je hmotnost vzorků na konci vážení a  $m_k$  (g) je hmotnost odpařené vody, vypočtená ze vztahu:

$$m_k = m_{w,0} - m_{w,end} \quad (g) \quad (10)$$

Jelikož každý vzorek měl na počátku jinou hmotnost, je potřeba množství odpařené vody vztáhnout na hmotnost vzorku. Bylo tedy vypočteno procentuální podíl odpařené vody  $P_k$  (% hm.):

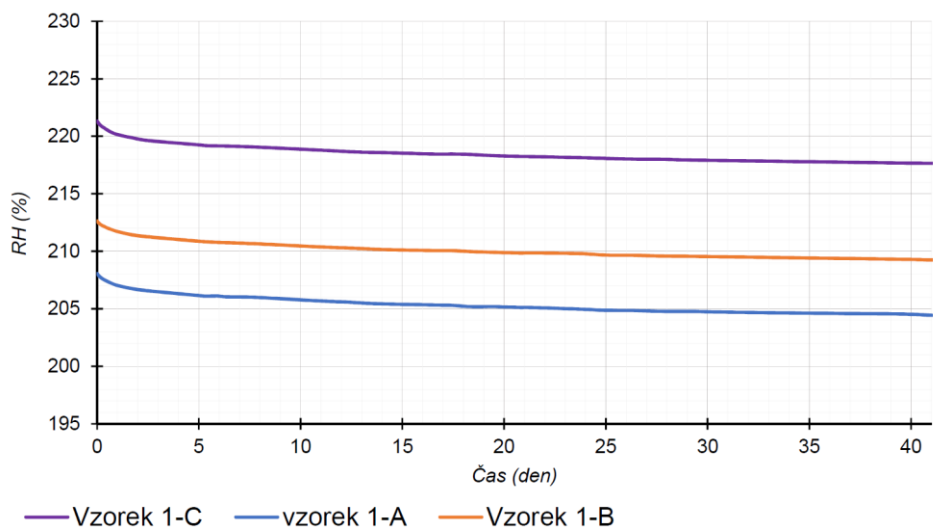
$$P_k = \frac{m_k}{m_{w,0}} 100 \quad (\% \text{ hm.}) \quad (11)$$

Výsledné hodnoty popisuje Tabulka 2.4.2-1.

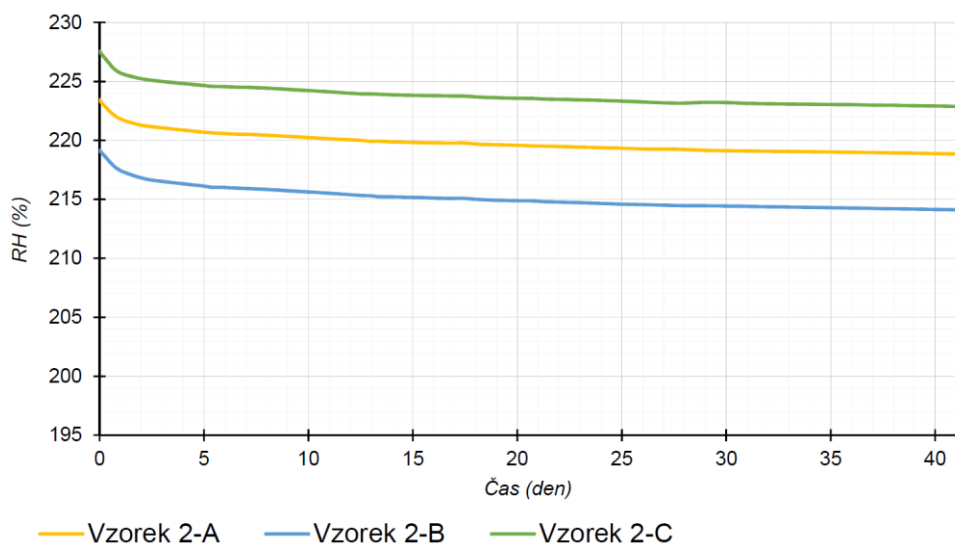
Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$m_{w,0}$ (g)	208,1	212,6	221,3	223,4	219,2	227,6	210,9	212,7	205,1
$m_{w,end}$ (g)	204,4	209,2	217,7	218,8	214,1	222,9	201,8	203,5	195,7
$m_k$ (g)	3,6	3,4	3,7	4,7	5,1	4,8	9,2	9,4	9,6
$P_k$ (% hm.)	1,7	1,6	1,7	2,1	2,3	2,1	4,4	4,4	4,7

Tabulka 2.4.2-1: Naměřené hodnoty v experimentu vysychání betonových vzorků

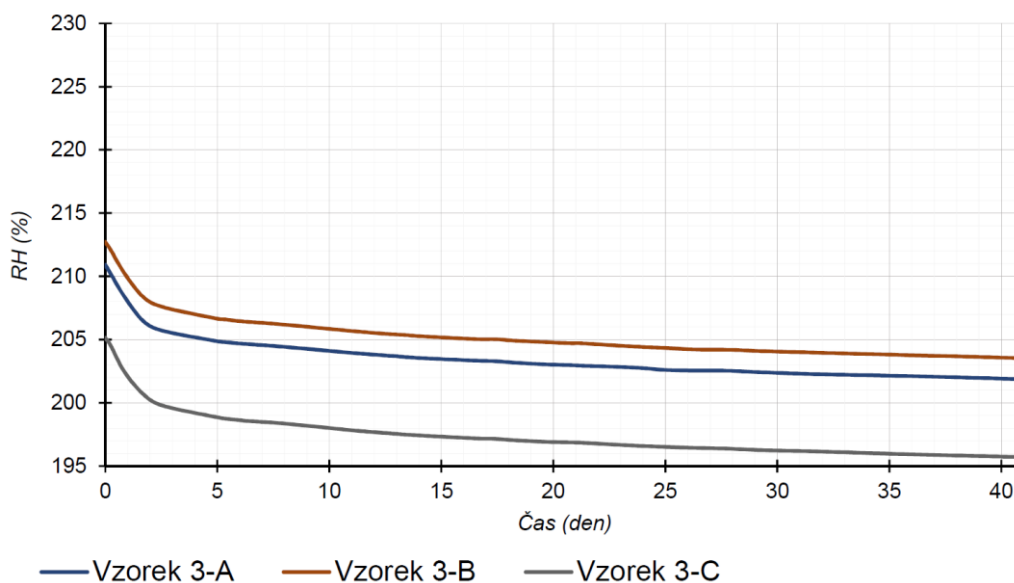
Průběh hmotnosti jednotlivých vzorků byl vyneseno do následujících grafů. Na svislé ose jsou vyneseny hmotnosti vzorků, na vodorovné ose časový průběh experimentu.



Graf 2.4.2-1: Průběh hmotnosti během vysychání vzorků betonové směsi I, vodní součinitel  $v = 0,5$



Graf 2.4.2-2: Průběh hmotnosti během vysychání vzorků směsi II, vodní součinitel  $v = 0,7$



Graf 2.4.2-3: Průběh hmotností během vysychání vzorků směsi III, vodní součinitel  $v = 1,1$

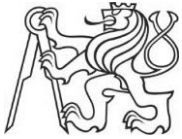
### 2.4.3 Posouzení naměřených hodnot, analýza výsledků

Z naměřených hodnot je patrné, že v prvních dnech došlo k velkému úbytku hmotnosti vzorků. V těchto dnech tedy došlo k hlavnímu odparu vody z povrchu materiálu. Po dvou dnech se rychlost odpařování zmenšuje a po 35 dnech již ke změně téměř nedochází.

Průběh hmotnosti v čase jednotlivých vzorků odpovídá předpokladům. V prvních dnech byla voda ve vzorcích rovnoměrně rozložena a relativní vlhkost vzduchu v pórovité struktuře betonu velmi vysoká. Rozdíl parciálních tlaků vodních par u povrchu betonu a v okolním vzduchu byl tedy vysoký a docházelo tak k rychlému vysychání betonu. Po několika dnech se relativní vlhkost u povrchu betonu snížila a rozdíl parciálních tlaků již nebyl tak vysoký, čímž došlo ke zpomalení vysychání.

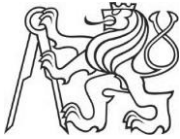
Lze také sledovat rozdílný vývoj hmotnostních křivek u tří betonových směsí. Zatímco u betonové směsi III dochází v prvních dnech k velkému poklesu vlhkosti, u betonových směsí I a II není pokles tak razantní a zpomalení vysychání není tak skokové. To je pravděpodobně způsobeno tím, že v prvních dnech dochází především k odparu záměsové vody, nikoliv vody z pórovité struktury betonu. Směs III obsahuje nejvíce záměsové vody díky vysokému vodnímu součiniteli, v prvních dnech tedy dojde k odpaření výrazně většího množství této vody než u směsí I a II. Tomu odpovídá také celkové množství odpařené vody za dobu experimentu, kterou popisuje Tabulka 2.4.2-1. Zatímco





hmotnost směsi I a II za dobu experimentu poklesla o 1,62 – 2,34 %, tak hmotnost směsi III poklesla o 4,37 – 4,68 %. Zde se jedná o téměř dvojnásobný rozdíl.

Výsledky experimentu tedy odpovídají předpokladům. Vývoj hmotnosti jednotlivých vzorků v průběhu experimentu je charakteristický pro vysychání betonu a mezi jednotlivými betonovými směsmi jsou patrné rozdíly. Lze říci, že vodní součinitel betonu má vliv na rychlost vysychání betonové podlahy a na celkové množství odpařené vody.



### 3 Matematický model vysychání vody z betonové podlahy

Tato kapitola se věnuje tvorbě a následné validaci matematického modelu vysychání vody z betonové podlahy. Model je vytvořen s užitím fyzikálních procesů vysychání. Jelikož vysychání probíhá dynamicky a jedná se o trojrozměrný proces, bylo nutné v modelu udělat řadu zjednodušení. Bylo však dbáno na to, aby provedená zjednodušení neměla výrazný vliv na sledované výstupy z matematického modelu. Tento fakt byl ověřen validací modelu s pomocí dostupného výpočtového softwaru a s pomocí experimentu vysychání betonových vzorků z kapitoly 2.4.

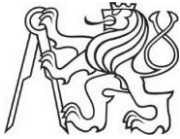
Problematika vysychání betonové podlahy je v praxi často řešená na reálných stavbách. Projektanti a konstruktéři odhadují, jak dlouho po vylití betonové podlahy lze přistoupit k dalším stavebním etapám, například k pokládce nášlapné vrstvy podlahy. Tyto stavební etapy je však možné provádět až po řádném vyschnutí betonové podlahy. Matematický model byl navržen tak, aby mohl být použit k odhadu doby, za kterou vlhkost betonu klesne pod požadovanou hodnotu.

#### 3.1 Průzkum dostupných výpočtových softwarů pro transport tepla a vlhkosti

Nejprve byl proveden průzkum dostupných výpočtových softwarů. Průzkum byl zaměřen zejména na princip výpočtu těchto softwarů a způsob jejich práce s okrajovými podmínkami. Jeden ze softwarů byl následně využit k validaci vlastního matematického modelu.

Mezi nejužívanější software pro simulaci transportu tepla a vlhkosti v pórovitých materiálech patří Wufi, Delphin a March [1]. Jedná se o modely schopné dynamické simulace transportu tepla a vlhkosti v pórovitých materiálech.

software Wufi navržený Hartwig M. Künzelem v jeho dizertační práci roku 1995 je nyní vyvíjen v Fraunhofer-Institutu für Bauphysik v Německu. Jedná se o matematický model, jež vychází ze soustavy dvou diferenciálních rovnic, které jsou vzájemně svázány. Neznámou zde tvoří teplota, na které závisí parciální tlaky vodních par v materiálu i v okolním vzduchu. Fyzikální vlastnosti materiálu je možno zadat parametricky, tedy například faktor difuzního toku materiálu lze zadat jako hodnotu závislou na relativní vlhkosti okolního vzduchu, stejně tak lze zadat jednotlivé body sorpční izotermy. Software Wufi byl jeho autory validován s pomocí praktických experimentů a naměřené hodnoty



ukázali, že simulace v softwaru Wufi odpovídá při zadání správných okrajových podmínek realitě. [2]

Základ softwaru Delphin položil John Grunewald roku 1987 ve své práci, kterou se snažil přiblížit problematiku šíření tepla a vlhkosti studentům. V nynější podobě Software popisuje transport vlhkosti v kapalně a plynné fázi. Vlastnosti materiálu lze, stejně jako v softwaru Wufi, zadat parametricky. Software obsahuje knihovnu klimatických dat a knihovnu materiálů. Tento software se užívá především k vyhodnocení kondenzace vodních par v tepelných mostech a při určení rizika plísní. [3]

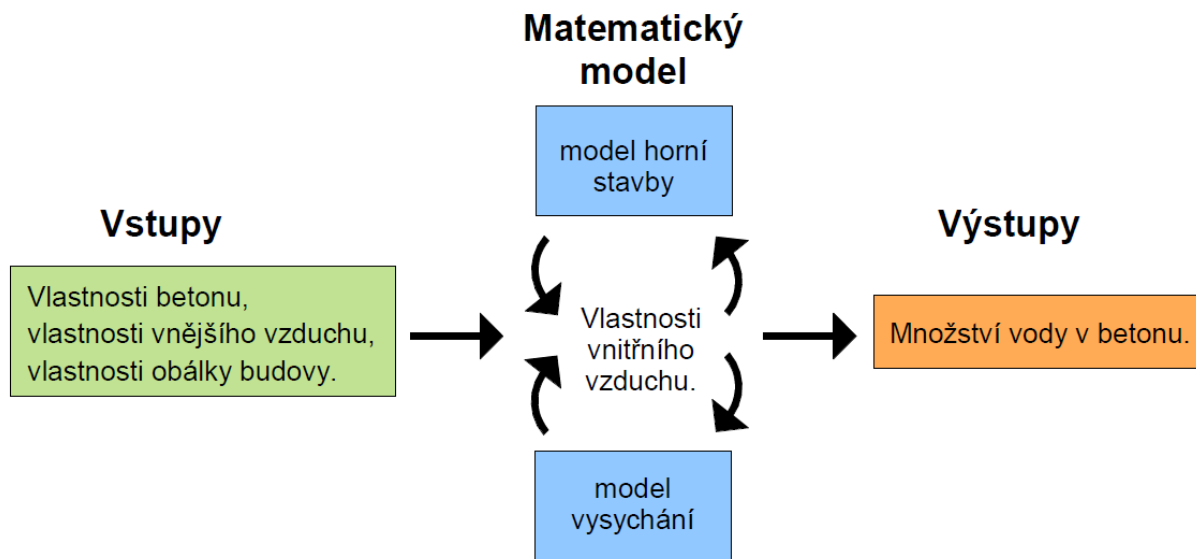
Software MATCH (Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials) vznikl v Dánsku roku 1989. Autorem programu je C. R. Pedersen. Rovněž se jedná o software pro dynamickou simulaci, kdy je možno zadat okrajové podmínky dynamicky, ve zvoleném časovém kroku výpočtu. [4]

Pro validaci vlastního matematického modelu byl využit software Wufi 5, protože se jedná o software, který se stále aktualizuje podle nových vědeckých poznatků a protože jeho funkce byla validovaná.

### **3.2 Popis modelu**

Tvorba vlastního matematického modelu vysychání vody z betonové podlahy provedena v softwaru MS Excel. Vstupními parametry pro matematický model jsou vlastnosti vnějšího vzduchu, vlastnosti obálky budovy a fyzikální vlastnosti betonu. Nejedná se o konstantní, ale v čase proměnné parametry. Simulace v matematickém modelu bude tedy dynamická s určitým časovým krokem.

K simulaci vysychání vody z betonové podlahy do budovy jsou potřeba dva dílčí matematické modely. Prvním je model vysychání vody z betonové podlahy a druhým je model horní stavby, který zaznamenává změny vnitřního prostředí budovy. Tyto dva dílčí modely jsou vzájemně závislé, jak ukazuje Obrázek 3.2-1.



Obrázek 3.2-1: Schéma matematického modelu

Vlastnosti vnitřního vzduchu tvoří vnitřní uzel celého modelu, který propojuje oba dílčí modely. Tvoří vstupní hodnoty pro oba dílčí modely a zároveň jsou ovlivněny výstupy z těchto modelů.

### 3.2.1 Matematický model vysychání vody z betonové podlahy

Transport vlhkosti v pórovitých materiálech probíhá třemi základními principy. Difuzí vodní páry, prouděním vlhkého vzduchu a kapilárním přenosem. Vliv každého principu na celkový transport vlhkosti je závislý na velikosti pórů materiálu.

Velikost pórů v betonu se pohybuje v rozmezí  $1 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-6}m$ , pokud vyloučíme póry vzniklé vlivem nedokonalého hutnění betonové směsi. Vzhledem k malé velikosti pórů v betonu je transport vlhkosti prouděním vlhkého vzduchu zanedbatelný. Ke kapilárnímu přenosu vody v betonové podlaze zajisté dochází. Ve srovnání s difuzí vodní páry se však jedná o pomalejší a dlouhodobější proces. Matematický model vysychání vody z betonové podlahy tedy počítá pouze s transportem vlhkosti vlivem difuze vodní páry a ostatní dva principy zanedbává.

Difuzní tok vodní páry ve vzduchu je popsán 1. Fickovým zákonem, který určuje hustotu a směr difuzního toku. K difuzi vodních par dochází vlivem rozdílných koncentrací vodní páry v samotném materiálu a v okolním vzduchu, přičemž směr difuze vodních par je z prostředí s vyšší koncentrací vodní páry do prostředí s nižší.



Difuzní tok je tedy úměrný gradientu koncentrací vodní páry. Pohyb vodní páry probíhá ve směru opačném vektoru gradientu koncentrace vodní páry. Hustota difuze vodní páry ve vzduchu  $g_{va}$  je tedy rovna:

$$g_{va} = -\delta_{\rho a} \frac{d\rho_v}{dx} \quad \left(\frac{kg}{m^2s}\right) \quad (12)$$

Kde  $\delta_{\rho a}$  ( $m^2/s$ ) je součinitel difuze vodní páry ve vzduchu a  $\rho_v$  ( $kg/m^3$ ) je koncentrace vodní páry.

Při difuzi vodní páry v pórovitém materiálu je hustota difuze vodní páry  $g_v$  ( $kg/(m^2s)$ ) nepřímo úměrná faktoru difuzního odporu  $\mu$  ( $-$ ) tohoto materiálu. Ten vyjadřuje, kolikrát je daný materiál propustnější vůči vodní páře než vzduch. Hustota difuze vodní páry v pórovitém materiálu je tedy rovna:

$$g_v = -\frac{\delta_{\rho a}}{\mu} \frac{d\rho_v}{dx} = -\frac{\delta_{\rho a} \Delta\rho_v}{\mu x_i} \quad \left(\frac{kg}{m^2s}\right) \quad (13)$$

Pokud však po určitém čase položíme na betonovou podlahu vrstvu jiného materiálu, například dřevěnou podlahu, bude tím hustota difuze vodní páry snížena.

Známe-li faktor difuzního odporu nové vrstvy  $\mu_n$  ( $-$ ) a tloušťku nové vrstvy  $x_n$  ( $m$ ), můžeme si vyjádřit ekvivalentní difuzní tloušťku této vrstvy  $sd$  ( $m$ ) jako:

$$sd = \mu_n x_n \quad (m) \quad (14)$$

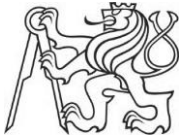
Abychom zmenšili počet parametrů, vyjádříme si ekvivalentní tloušťku nové vrstvy v závislosti na faktoru difuzního odporu betonu tak, aby ekvivalentní difuzní tloušťka nové vrstvy zůstala zachována:

$$sd = \mu_n x_n = \mu x_{ekv} \quad (m) \quad (15)$$

Ekvivalentní tloušťka nové vrstvy  $x_{ekv}$  je tedy rovna:

$$x_{ekv} = \frac{\mu_n x_n}{\mu} \quad (m) \quad (16)$$

Po dosazení do rovnice (13) dostáváme vztah pro hustotu difuzního toku betonem s vrstvou jiného materiálu:



$$g_v = - \frac{\delta_{\rho a}(\rho_{v,sat} - \rho_{v,i})}{\mu(x_i + x_{new})} \quad \left(\frac{kg}{m^2s}\right) \quad (17)$$

Kde  $\rho_{v,sat}$  ( $kg/m^3$ ) je koncentrace nasycené vodní páry a  $\rho_{v,i}$  ( $kg/m^3$ ) koncentrace vodních par okolního vzduchu.

Pro sledování množství vody odpařené z betonové podlahy je potřeba sestavit bilanční rovnici vodních par. Změna hmotnosti vodní páry v materiálu  $m_w$  ( $kg$ ) v čase  $\tau$  ( $s$ ) je rovna hustotě difuze vodní páry  $g_v$  ( $kg/(m^2s)$ ) přes měrnou plochu materiálu  $A$  ( $m^2$ ):

$$\frac{dm_w}{d\tau} + g_v A = 0 \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (18)$$

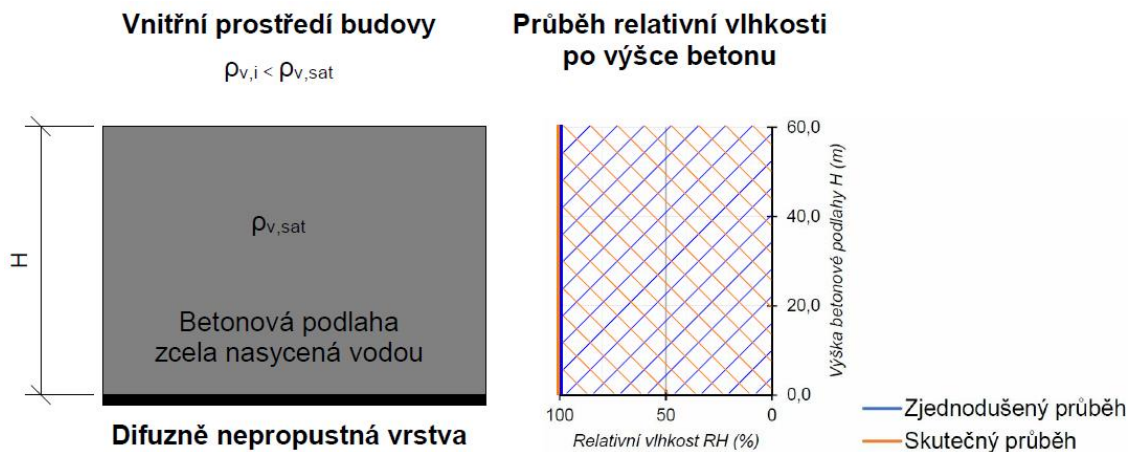
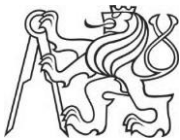
Hmotnost vody v pórovitém materiálu lze vyjádřit v závislosti na podílu zaplněných pórů v materiálu. Pokud by materiál byl zcela nasycen a všechny póry by byly zaplněny vodou, můžeme hmotnost vody v materiálu vyjádřit pomocí rovnice:

$$m_w = \rho_w \phi_o V \quad (kg) \quad (19)$$

Kde  $\rho_w$  ( $kg/m^3$ ) je hustota vody,  $\phi_o$  ( $-$ ) pórovitost materiálu a  $V$  ( $m^3$ ) objem pórovitého materiálu.

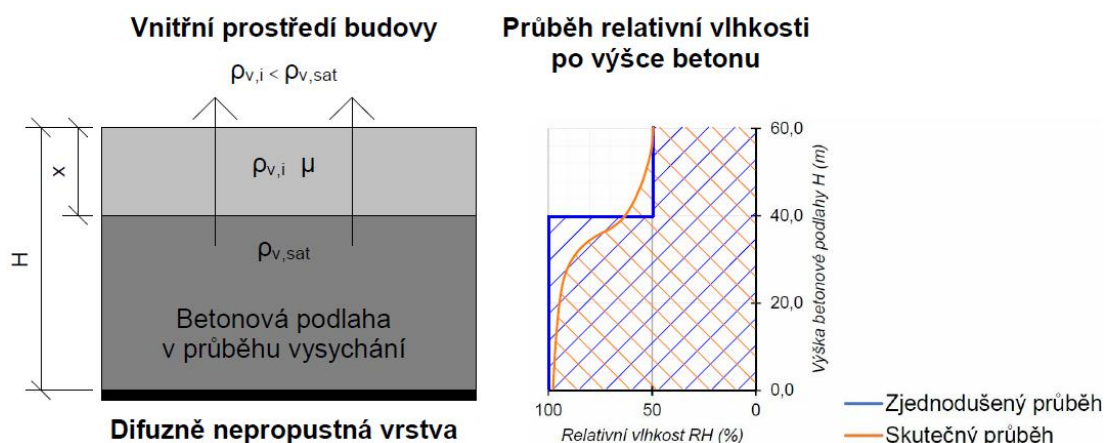
Máme-li určitý kontrolní kvádr pórovitého materiálu, jež vysychá do okolního prostředí skrz svou jednu stranu, můžeme jej rozdělit na dva kontrolní objemy tak, že řez mezi objemy vedeme rovnoběžně se stranou, skrz kterou vzorek vysychá. Každý objem má různou koncentraci vodních par v pórovité struktuře. První objem představuje vyschlou část betonové podlahy, kde je koncentrace vodních par rovnovážná s vnitřním prostředím budovy. Druhý objem představuje vlhkou část podlahy, kde je koncentrace vodních par na hranici nasycení a relativní vlhkost je tudíž rovna 100 %.

Schéma betonové podlahy bezprostředně po vylití znázorňuje Obrázek 3.2.1-1. Beton je zcela nasycen vodou a tudíž je první objem představující vyschlou část betonové podlahy nulový. V příloženém grafu je znázorněn průběh relativní vlhkosti po výšce betonové podlahy, který je konstantní a roven 100 %.



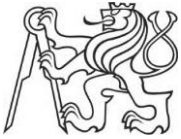
Obrázek 3.2.1-1: Schéma betonové podlahy bezprostředně po vylití

Pokud betonová podlaha začne vysychat, dochází k zvětšování prvního objemu představujícího vyschlou část betonu, jak znázorňuje Obrázek 3.2.1-2. Zjednodušená metoda dvou kontrolních objemů uvažuje, že mezi kontrolním objemem nasyceným vodou a kontrolním objemem vyschlým dochází ke skokové změně relativní vlhkosti, jak znázorňuje přiložený graf. V grafu je znázorněn také odhad skutečného průběhu relativní vlhkosti po výšce materiálu. Ten má plynulý průběh a tvar křivky je obdobný jako tvar sorpční izotermie betonu. Celkové množství vody v betonové podlaze lze spočítat jako obsah plochy pod křivkou relativní vlhkosti. Jde tedy vidět, že celkové množství vody v betonu spočtené s užitím zjednodušené metody dvou kontrolních objemů je obdobné jako skutečný obsah vody v betonu.



Obrázek 3.2.1-2: Schéma betonové podlahy v průběhu vysychání

Obrázek 3.2.1-2 také ukazuje, že vodní pára z druhého kontrolního objemu se odpařuje do vnitřního prostředí budovy přes pórovitou strukturu prvního kontrolního objemu. Hustota difuze vodní páry  $g_v$  ( $kg/(m^2s)$ ) z tohoto objemu je tedy nepřímo



úměrná faktorů difuzního odporu betonu  $\mu$  (–) a vzdálenosti od vnitřního prostředí budovy  $x$  (m), jak udává rovnice (13).

Hmotnost vody v betonové podlaze můžeme tedy nahradit vztahem:

$$m_w = \rho_w \phi_o (H - x) A \quad (\text{kg}) \quad (20)$$

Kde  $A$  ( $m^2$ ) je plocha strany přilehlé k okolnímu prostředí,  $H$  (m) je celková výška materiálu a  $x$  (m) je výška vyschlé části materiálu, kde je koncentrace vodní páry rovnovážná s vnitřním prostředím. Je tedy patrné, že pokud je materiál zcela nasycen vodou,  $x$  je rovno nule. Naopak, pokud je materiál zcela vyschlý,  $x$  je rovno výšce materiálu  $H$ .

Při tomto zjednodušení je tedy rozdíl koncentrací vodních par  $\Delta\rho_v$  (Pa):

$$\Delta\rho_v = \rho_{v,sat} - \rho_{v,i} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad (21)$$

Kde  $\rho_{v,sat}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) je koncentrace nasycené vodní páry ve vlhké části betonové podlahy a  $\rho_{v,i}$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) koncentrace vodních par okolního vzduchu.

Pokud rovnici (20) a (21) dosadíme do vlhkostní bilance vodních par v pórovitém materiálu popsané rovnicí (18), dostaneme:

$$\frac{d\rho_w \phi_o (H - x) A}{d\tau} + \frac{(\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}) \delta\rho_a}{\mu(x + x_{ekv})} A = 0 \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \quad (22)$$

Hustota vody  $\rho_w$ , pórovitost  $\phi_o$ , výška materiálu  $H$  a měrná plocha  $A$  jsou v čase konstantní. Jejich změna je tudíž rovna nule. Po úpravách dostáváme bilanci vodních par:

$$\frac{\rho_w \phi_o dx}{d\tau} = \frac{(\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}) \delta\rho_a}{\mu(x + x_{ekv})} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \quad (23)$$

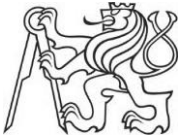
Využijeme numerického řešení této diferenciální rovnice a derivaci vzdálenosti podle času nahradíme rozdílem výšky vyschnuté části betonové podlahy  $x_i$  na počátku a na konci časového kroku  $h$  (s):

$$\frac{dx}{d\tau} \approx \frac{x_i^{new} - x_i^{old}}{h} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \quad (24)$$

Po dosazení do rovnice (23) dostáváme:

$$\frac{\rho_w \phi_o (x_i^{new} - x_i^{old})}{h} = \frac{(\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}) \delta\rho_a}{\mu(x_i + x_{ekv})} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \quad (25)$$





Využijeme implicitní metodu k řešení této rovnice, jelikož je numericky stabilní. Za vzdálenost  $x_i$  tedy dosadíme  $x_{new}$ .

Pro přehlednost řešení můžeme využít substituci:

$$C = \rho_w \phi_o \mu$$

$$D = (\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}) \delta_{p,a}$$

Numerickým řešením diferenciální rovnice pro bilanci vodních par v pórovitém materiálu je vztah:

$$x_{new_{1,2}} = \frac{Cx_{old} - Cx_{ekv} \pm \sqrt{C^2(x_{ekv} - x_{old})^2 + 4C(Cx_{old}x_{ekv} + Dh)}}{2C} \quad (m) \quad (26)$$

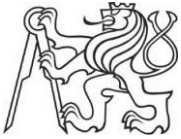
Při vysychání vody z betonové podlahy nedojde k vyschnutí veškeré vody. Pokud se koncentrace vodních par v pórovité struktuře betonu dostane do rovnováhy s okolním vzduchem, je hustota difuzního toku rovna nule. Ze sorpční izotermy můžeme stanovit hmotnostní vlhkost betonu k příslušné relativní vlhkosti okolního vzduchu, při které je této rovnováhy dosaženo. Pokud při simulaci vysychání vody klesne hmotnostní vlhkost betonu na tuto hodnotu, je v tomto časovém kroku hmotnost odpařené vody rovna nule.

### 3.2.2 Matematický model horní stavby

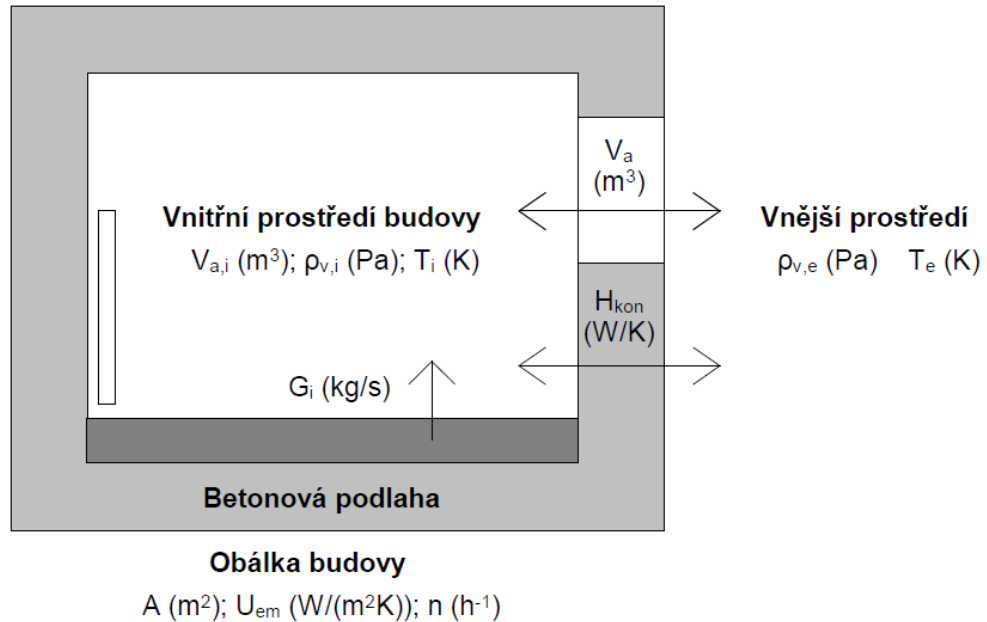
Uvažujme horní stavbu jako konstantní objem vzduchu, jež je od venkovního prostředí oddělen obálkou budovy. Přes tuto obálku probíhá transport vlhkosti a tepla. Matematický model horní stavby je navržen jako jednouzlový model a sledovaným parametrem je teplota a relativní vlhkost vnitřního vzduchu.

#### a) Transport vlhkosti skrz obálku horní stavby

K transportu vlhkosti skrz obálku horní stavby nejvýznamněji přispívá větrání budovy, kdy dochází k výměně vnitřního vzduchu za venkovní a tím ke změně teploty a koncentrace vodních par vnitřního vzduchu. Dále skrz obálku probíhá transport vlhkosti stavebními konstrukcemi a dochází k akumulaci vlhkosti v těchto konstrukcích a ve vnitřním prostoru. Tyto jevy však mají minimální vliv na vlastnosti vnitřního vzduchu v porovnání s větráním. Pro zjednodušení je tedy zanedbáme. Důležitým prvkem, který



ovlivňuje parametry vnitřního vzduchu je samotná betonová podlaha, ze které dochází k odparu značného množství vody. Schéma bilance vlhkosti v horní stavbě znázorňuje Obrázek 3.2.2-1.



Obrázek 3.2.2-1: Schéma bilance vlhkosti v horní stavbě

Sestavme nyní vlhkostní bilanci vnitřního vzduchu v horní stavbě. Objem vzduchu horní stavby tvoří jeden uzel modelu a budeme sledovat obsah vody v tomto vzduchu v závislosti na čase. Změna hmotnosti vody  $m_v$  (g) v čase  $\tau$  (s) odpovídá příspěvku vlhkosti z betonové podlahy  $G_i$  (kg/s) a výměně vlhkosti s venkovním prostředím pomocí větrání. Dostáváme rovnici:

$$\frac{dm_v}{d\tau} = G_i - \dot{V}_a(\rho_{v,i} - \rho_{v,e}) \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (27)$$

Kde  $\dot{V}_a$  ( $m^3/s$ ) je objem větraného vzduchu,  $\rho_{v,i}$  ( $kg/m^3$ ) je koncentrace vlhkosti vnitřního vzduchu a  $\rho_{v,e}$  ( $kg/m^3$ ) je koncentrace vlhkosti venkovního vzduchu.

Hmotnost vodní páry vnitřního vzduchu lze vyjádřit pomocí koncentrace vlhkosti vnitřního vzduchu  $\rho_{v,i}$  ( $kg/m^3$ ) a objemu vnitřního vzduchu  $V_{a,i}$  ( $m^3$ ) jako:

$$m_v = \rho_{v,i} V_{a,i} \quad (kg) \quad (28)$$

Kde objem vnitřního vzduchu je v čase konstantní. Po dosazení do bilanční rovnice tedy dostáváme:

$$V_{a,i} \frac{d\rho_{v,i}}{d\tau} = G_i - \dot{V}_a(\rho_{v,i} - \rho_{v,e}) \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (29)$$



Výsledkem je diferenciální rovnice. Využijeme numerického řešení a derivaci koncentrace vodní páry podle času nahradíme rozdílem koncentrace vodní páry  $\rho_{v,i}$  na počátku a na konci časového kroku  $h$  (s):

$$\frac{d\rho_{v,i}}{d\tau} \approx \frac{\rho_{v,i}^{new} - \rho_{v,i}^{old}}{h} \quad \left(\frac{kg}{m^3s}\right) \quad (30)$$

Po dosazení do rovnice (29) dostáváme:

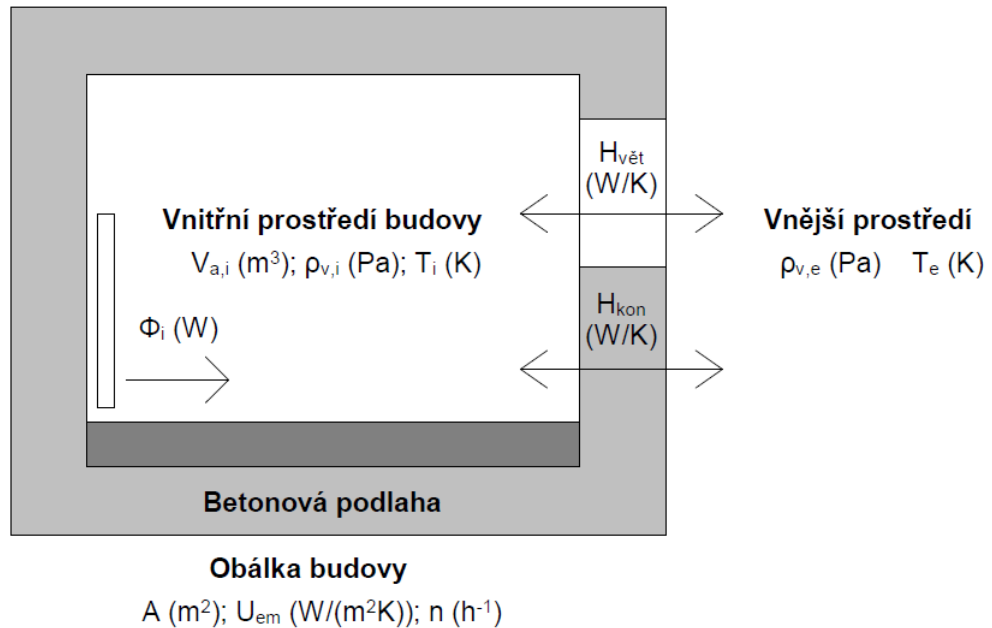
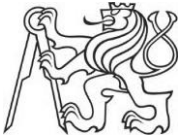
$$V_{a,i} \frac{\rho_{v,i}^{new} - \rho_{v,i}^{old}}{h} = G_i - \dot{V}_a (\rho_{v,i} - \rho_{v,e}) \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (31)$$

Stejně jako v matematickém modelu vysychání vody z betonové podlahy využijeme implicitní metodu k řešení této rovnice a za koncentraci vodní páry  $\rho_{v,i}$  dosadíme  $\rho_{v,i}^{new}$  a dostáváme řešení diferenciální rovnice:

$$\rho_{v,i}^{new} = \frac{hG_i + h\dot{V}_a\rho_{v,e} + V_{a,i}\rho_{v,i}^{old}}{V_{a,i} + h\dot{V}_a} \quad \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad (32)$$

## b) Transport tepla skrz obálku horní stavby

K transportu tepla skrz obálku horní stavby nejvýznamněji dochází tepelnými toky skrz obálku budovy a větráním. Dále mají na teplotu vnitřního vzduchu vliv tepelné zisky z vnitřních tepelných zdrojů, akumulace tepla v konstrukcích a solární zisky. Akumulace tepla v obvodových konstrukcích je ve srovnání s ostatními jevy zanedbatelná a pro zjednodušení ji tedy zanedbáme. Solární zisky mají významný vliv na teplotu vnitřního vzduchu, ale dají se jen nepřesně předvídat. Proto je budeme uvažovat jako nulové, čímž bude teplota vnitřního vzduchu nabývat nižších hodnot. Tímto zjednodušením jsme tedy na straně bezpečnosti. Schéma teplotní bilance horní stavby znázorňuje Obrázek 3.2.2-2.



Obrázek 3.2.2-2: Schéma teplotní bilance horní stavby

Změna teploty  $T_i$  (K) za čas  $\tau$  (s) je rovna rozdílu vnitřních tepelných zisků  $\Phi_i$  (W) a tepelných ztrát konstrukcemi a větráním:

$$C \frac{dT_i}{d\tau} = \Phi_i - H(T_i - T_e) \quad (W) \quad (33)$$

Kde  $C$  (J/K) je tepelná kapacita vnitřního vzduchu,  $T_i$  (K) je termodynamická teplota vnitřního vzduchu,  $T_e$  (K) termodynamická teplota vnějšího vzduchu a  $H$  (W/K) je celkový měrný tepelný tok.

Výsledkem je tedy diferenciální rovnice. Využijeme numerického řešení a derivaci teploty podle času nahradíme rozdílem teplot  $T_i$  na počátku a na konci časového kroku  $h$  (s):

$$\frac{dT_i}{d\tau} \approx \frac{T_i^{new} - T_i^{old}}{h} \quad \left(\frac{K}{s}\right) \quad (34)$$

Po dosazení do rovnice (33) dostáváme:

$$C \frac{T_i^{new} - T_i^{old}}{h} = \Phi_i - H(T_i - T_e) \quad (W) \quad (35)$$

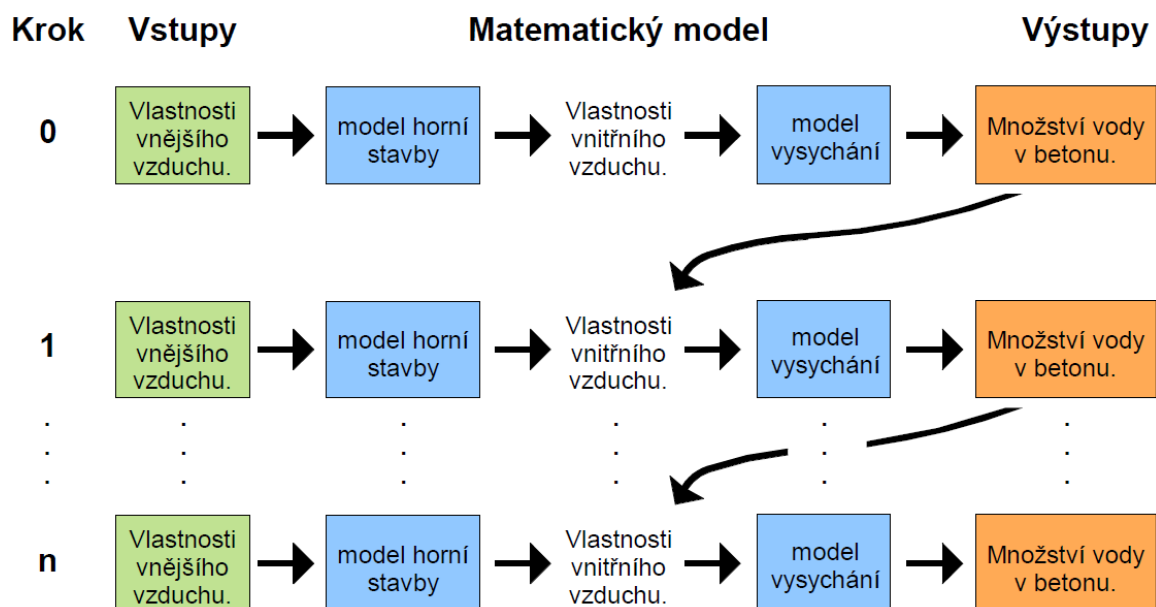
Využijeme implicitní metodu k řešení této rovnice a za teplotu vnitřního vzduchu  $T_i$  dosadíme  $T_i^{new}$  a dostáváme řešení diferenciální rovnice:



$$T_i^{new} = \frac{CT_i^{old} + h\Phi_i + hHT_e}{C + hH} \quad (K) \quad (36)$$

### 3.2.3 Napojení matematického modelu vysychání vody z betonové podlahy na model horní stavby

Oba matematické modely závisí na vlastnostech vnitřního vzduchu a vzájemně se přes tento parametr ovlivňují. Časový krok  $h$  je shodný pro oba modely. Byl tedy zaveden nultý krok, ve kterém jsou stanoveny vstupní parametry na počátku výpočtu. Poté je proveden výpočet matematického modelu horní stavby. Výstupní hodnoty vnitřního vzduchu z tohoto modelu jsou následně načteny do modelu vysychání a je proveden výpočet i v tomto modelu. Množství vody v betonu, respektive množství odpařené vody z betonu, ovlivní vlastnosti vnitřního vzduchu v dalším kroku. Dochází tedy k předřazení modelu horní stavby před model vysychání. Schéma napojení obou modelů znázorňuje Obrázek 3.2.3-1.



Obrázek 3.2.3-1: Schéma napojení modelu horní stavby a modelu vysychání vody z betonové podlahy

## 3.3 Validace matematického modelu

### 3.3.1 Srovnání se softwarem Wufi

Softwar Wufi je popsán v kapitole 3.1 Průzkum dostupných výpočtových softwarů pro transport tepla a vlhkosti. Jedná se o výpočtový software pro dynamickou simulaci transportu vlhkosti a tepla v pórovitých materiálech.



Matematický model popsáný v kapitole 3.2 Popis modelu pracuje pouze s difuzí vodních par a zanedbává kapilární přenos v materiálu. Proto byl v softwaru Wufi kapilární přenos také zanedbán.

Software Wufi slouží k modelování tepelně vlhkostních procesů v určitém materiálu, ale neobsahuje model horní stavby. Výsledky ze softwaru Wufi tedy můžeme porovnávat pouze se simulací v modelu vysychání. Proto byla zadána vysoká násobnost větrání  $n = 1000 h^{-1}$ . Tím dochází k tak velké výměně vzduchu v místnosti, že parametry vnitřního vzduchu v každém kroku jsou shodné s parametry vnějšího vzduchu a model horní stavby je prakticky vypnut.

### a) Vysychání vody z jednovrstvé betonové podlahy s konstantními parametry vnějšího vzduchu

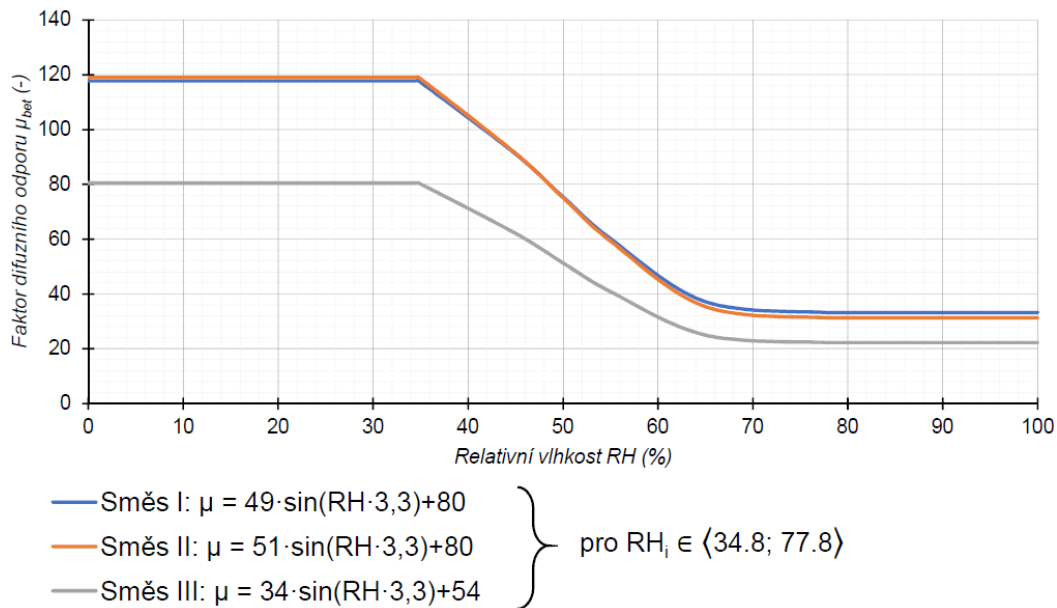
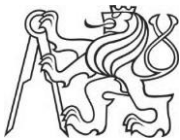
Nejprve byl proveden výpočet vysychání jednovrstvé betonové podlahy s časově konstantními parametry vnějšího vzduchu.

Jako vstupní hodnoty pro matematický model je potřeba zadat vlastnosti betonu a parametry vnějšího vzduchu. Za vlastnosti betonu byly dosazeny vlastnosti betonové směsi I, jež byly změřeny a popsány v kapitole 2.3 Laboratorní měření. Shrnuje je následující Tabulka 3.3.1-1.

Naměřené hodnoty	$v$ (-)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Phi_o$ (-)	$w_h$ (%) pro RH rovno:			
				23.1%	58.2%	85.1%	97.4%
Směs I	0.5	1992	0.07	1.28	1.24	2.38	3.38

Tabulka 3.3.1-1: Naměřené vlastnosti jednotlivých betonových směsí

Faktor difuzního odporu  $\mu$  (-) byl vyjádřen v závislosti na relativní vlhkosti tak, jak je popsáno v kapitole 2.3.5 Měření faktoru difuzního odporu. Parametrické vyjádření popisuje Graf 3.3.1-1.

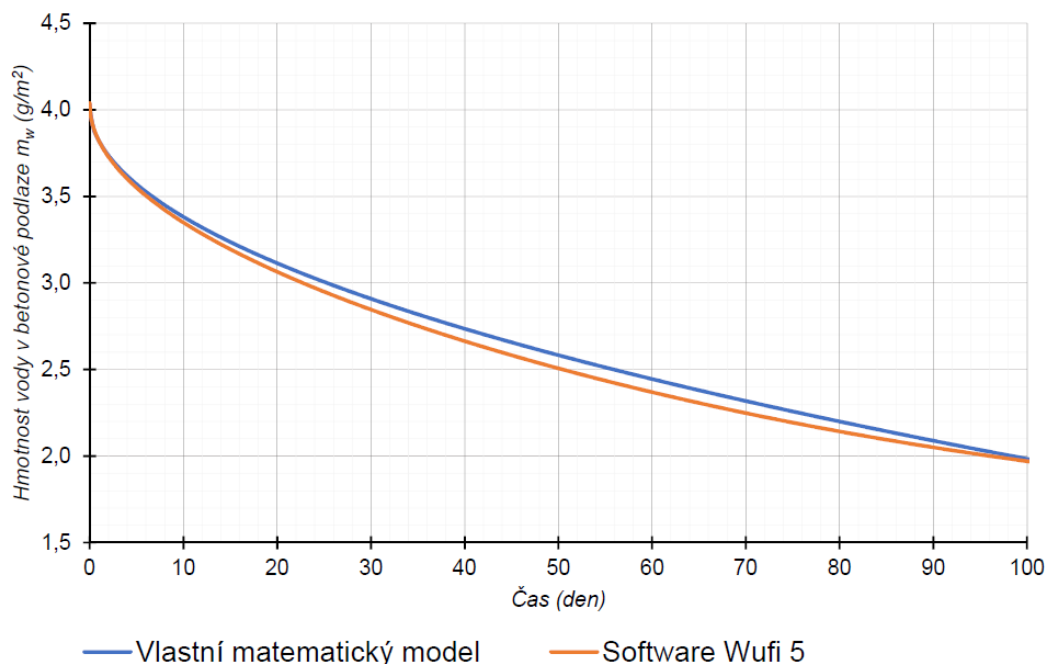


Graf 3.3.1-1: Odhad závislosti faktoru difuzního odporu betonových směsí na střední relativní vlhkosti

Mocnost betonové podlahy byla zadána  $H = 0,06 \text{ m}$ , což odpovídá v praxi běžně užívané tloušťce roznášecí betonové podlahy. Beton byl zadán jako zcela nasycen vodou.

Za parametry vnějšího vzduchu byly dosazeny časově neměnné hodnoty. Teplota vnějšího vzduchu  $\theta_e = 25,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , relativní vlhkost vnějšího vzduchu  $RH_e = 50 \%$  a teplota vnitřního vzduchu na počátku výpočtu  $\theta_{i,0} = 25,9 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkost vnitřního vzduchu na počátku výpočtu  $RH_{i,0} = 50 \%$ .

Výpočet v matematickém modelu i v softwaru Wufi byl proveden s časovým krokem  $h = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$ . Sledovanou výstupní hodnotou byla hmotnost vody v betonu  $m_w \text{ (kg)}$ . Výsledky z matematického modelu i ze softwaru Wufi znázorňuje Graf 3.3.1-2.



Graf 3.3.1-2: Výsledné hodnoty hmotnosti vody v betonové podlaze ze simulace ve vlastním matematickém modelu a v softwaru Wufi 5

Z grafu je vidět, že hodnoty vlastního matematického modelu, jež je popsán v kapitole 3.2 Popis modelu se příliš neliší od výpočtu provedeném v softwaru Wufi. Odchylna průběhu vysychání modelovaného betonu v obou programech je způsobena zjednodušením popsáním v úvodu této kapitoly. Matematický model navržený v této práci zjednodušuje proces vysychání rozdělením vzorku na kontrolní objemy, přičemž každý kontrolní objem je buďto zcela nasycen vodní parou, nebo zcela „vyschlý“, což znamená, že relativní vlhkost vzduchu v jeho pórech je rovnovážná s relativní vlhkostí okolního vzduchu. Tímto je způsobena nepřesnost tohoto modelu. V reálném stavu totiž nedochází k takto „skokovému“ rozdělení relativní vlhkosti po výšce betonové podlahy, nýbrž k plynulému rozdělení, kdy se mezi zcela nasyceným kontrolním objemem uvnitř betonové podlahy a okolním vzduchem mění relativní vlhkost plynule. Jde však vidět, že toto zjednodušení nemá významný vliv na výsledný průběh vysychání a lze tedy uvažovat tento matematický model za vyhovující.

### b) Vysychání vody z betonové podlahy s konstantními parametry vnitřního vzduchu při zakrytí dřevěnou vrstvou

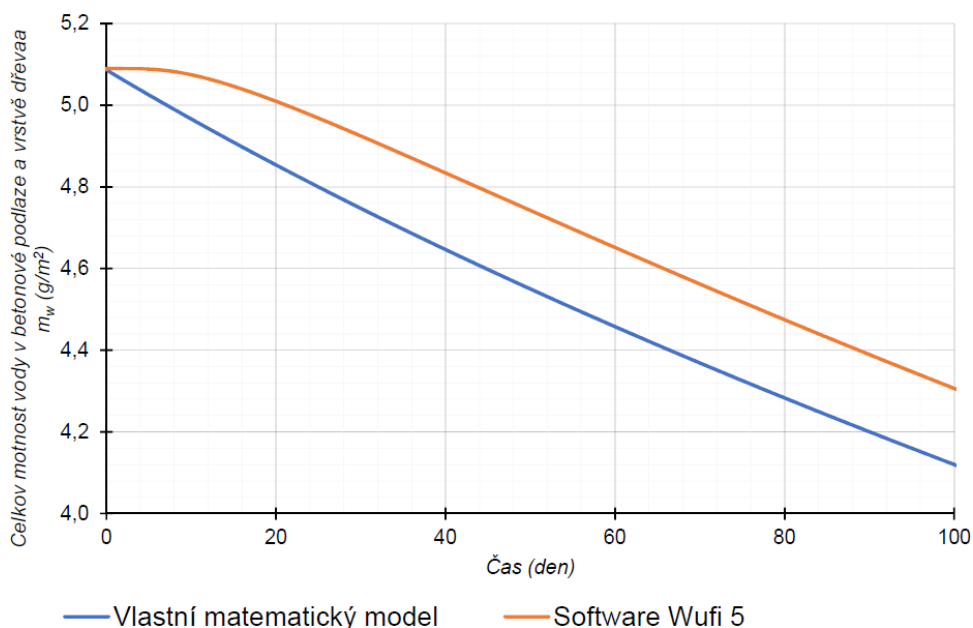
Jako další srovnání vlastního matematického modelu se softwarem Wufi byla provedena simulace vysychání betonové podlahy, na které je položena vrstva dřeva o tloušťce 15 mm. Vlastnosti betonu, parametry vnějšího vzduchu a vnitřního vzduchu na





počátku výpočtu byly zadány shodně se simulací v předchozím příkladu 3.3.1a). Nad beton byla přidána vrstva materiálu dřeva o mocnosti  $x_{dřeva} = 0,15 \text{ m}$ . Faktor difuzního odporu dřeva byl zadán  $\mu = 140 (-)$  a množství vody ve dřevě na počátku výpočtu bylo zadáno  $m_{w,0} = 70 \text{ kg/m}^3$ . Tato hodnota odpovídá rovnovážné vlhkosti dřeva při relativní vlhkosti okolního vzduchu  $RH = 50 \%$ . Vzhledem k tomu, že relativní vlhkost okolního vzduchu byla zadána jako konstantní po celou dobu výpočtu na hodnotu  $RH = 50 \%$ , nebude docházet k odparu vlhkosti obsažené ve vrstvě dřeva na počátku simulace.

Výpočet v matematickém modelu i v softwaru Wufi byl proveden s časovým krokem  $h = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$ . Sledovanou výstupní hodnotou byla celková hmotnost vody v podlaze  $m_w \text{ (kg)}$ . Jedná se tedy o součet vody v betonu a ve vrstvě dřeva. Výsledky z matematického modelu i ze softwaru Wufi znázorňuje Graf 3.3.1-3.



Graf 3.3.1-3: Výsledné hodnoty celkové hmotnosti vody v betonové podlaze a vrstvě dřeva ze simulace ve vlastním matematickém modelu a v softwaru Wufi 5

Vidíme, že odchylka vlastního matematického modelu od výpočtu v softwaru Wufi je značná. Jde ale vidět, že odchylka vzniká v prvních krocích výpočtu, kdy je průběh křivky softwaru Wufi výrazně jiný. V tomto období klesá hmotnost vody v souvrství podlahy mnohem méně, než je tak u výpočtu ve vlastním matematickém modelu. Tento jev lze vysvětlit situací, kdy voda odpařovaná z betonové podlahy difunduje do vrstvy dřeva a akumuluje se zde. Z počátku simulace v softwaru Wufi dochází jen k velmi malému odparu vody z vrstvy dřeva. Po deseti dnech se však vodní pára ve vrstvě dřeva přestává



akumulovat a dochází k odparu vodní páry z této vrstvy. Od tohoto časového kroku má hmotnostní křivka softwaru Wufi obdobný průběh, jako hmotnostní křivka vlastního matematického modelu.

Lze tedy říci, že vlastní matematický model popsáný v kapitole 3.2 Popis modelu je jednodušový a tudíž nepočítá s akumulací vodní páry v druhé vrstvě. Průběh vysychání lze tedy považovat za odpovídající, ale není zde započítán fázový posun hmotnostní křivky způsobený akumulací v nové vrstvě.

### 3.3.2 Modelování experimentu vysychání z kapitoly 2.4

Popis experimentu byl proveden v kapitole 2.4 Experiment vysychání betonových směsí. V experimentu byla zaznamenána hmotnost odpařené vodní páry z jednotlivých vzorků a je znám průběh relativní vlhkosti a teploty okolního vzduchu.

Vysychání jednotlivých betonových vzorků bylo simulováno v matematickém modelu vysychání. Srovnáním dat z matematické simulace a z průběhu vysychání naměřeného v experimentu byl validován a kalibrován matematický model.

Naměřené hodnoty z provedeného experimentu můžeme porovnávat pouze se simulací v modelu vysychání, nikoliv v modelu horní stavby. Proto byla zadána vysoká násobnost větrání  $n = 1000 \text{ h}^{-1}$ . Tím dochází k tak velké výměně vzduchu v místnosti, že parametry vnitřního vzduchu v každém kroku jsou shodné s parametry vnějšího vzduchu a model horní stavby je prakticky vypnut.

#### a) Simulace v matematickém modelu s užitím naměřených hodnot

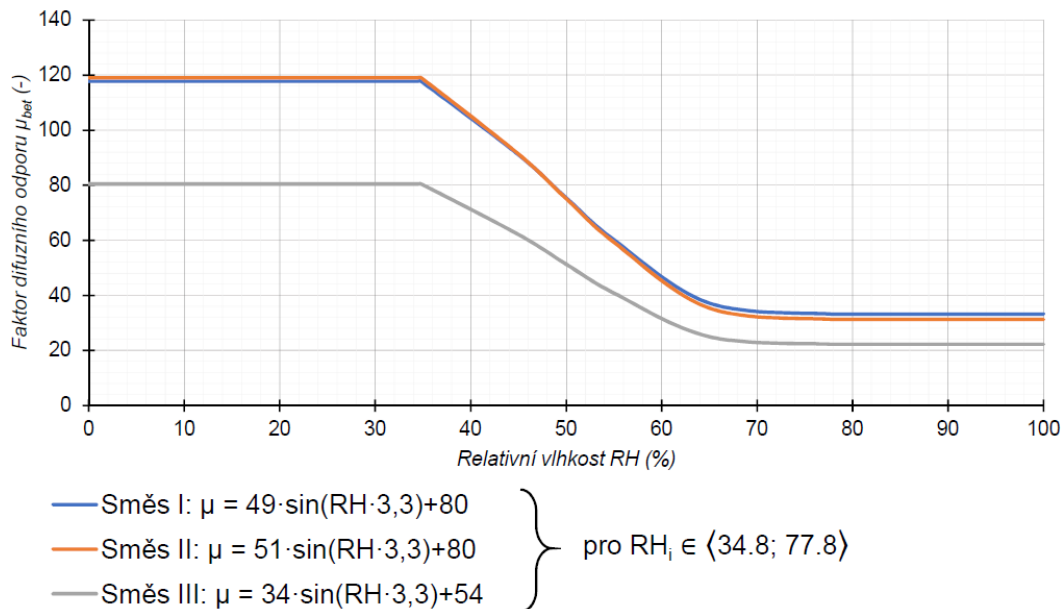
Jako vstupní hodnoty pro matematický model je potřeba zadat vlastnosti betonu a parametry vnějšího vzduchu. Vlastnosti jednotlivých betonových vzorků byly stanoveny v kapitole 2.3 Laboratorní měření. Otevřenou pórovitost shrnuje následující Tabulka 3.3.2-1.

Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$\Phi_o$ (-)	0,069	0,079	0,068	0,080	0,088	0,080	0,139	0,138	0,143

Tabulka 3.3.2-1: Odhad otevřené pórovitosti jednotlivých betonových vzorků



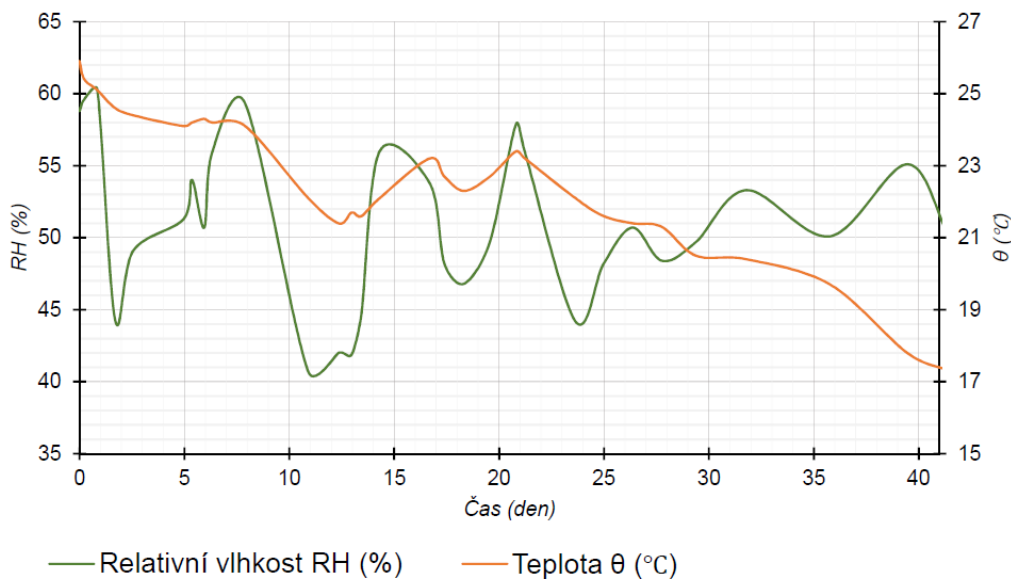
Faktor difuzního odporu  $\mu$  (–) byl vyjádřen v závislosti na relativní vlhkosti tak, jak je popsáno v kapitole 2.3.5 Měření faktoru difuzního odporu. Parametrické vyjádření faktoru difuzního odporu popisuje Graf 3.3.2-1.



Graf 3.3.2-1: Odhad závislosti faktoru difuzního odporu betonových směsí na střední relativní vlhkosti

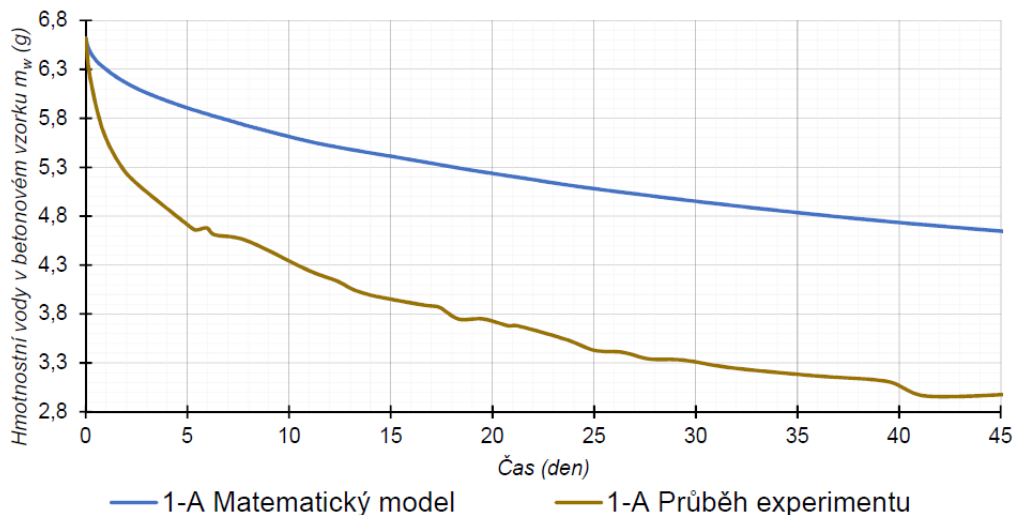
Betonové vzorky byly rozměru  $4 \times 4 \times 6 \text{ cm}$ . Mocnost betonové podlahy byla tedy zadána jako  $H = 0,06 \text{ m}$  a plocha podlahy  $A_{\text{podlahy}} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Na počátku simulace byly vzorky uvažovány jako zcela nasycené vodou.

Za parametry vnějšího vzduchu byly dosazeny hodnoty naměřené v průběhu experimentu. Průběh teploty  $\theta_e$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) a relativní vlhkosti vzduchu  $RH_e$  (%) v čase znázorňuje Graf 3.3.2-2.

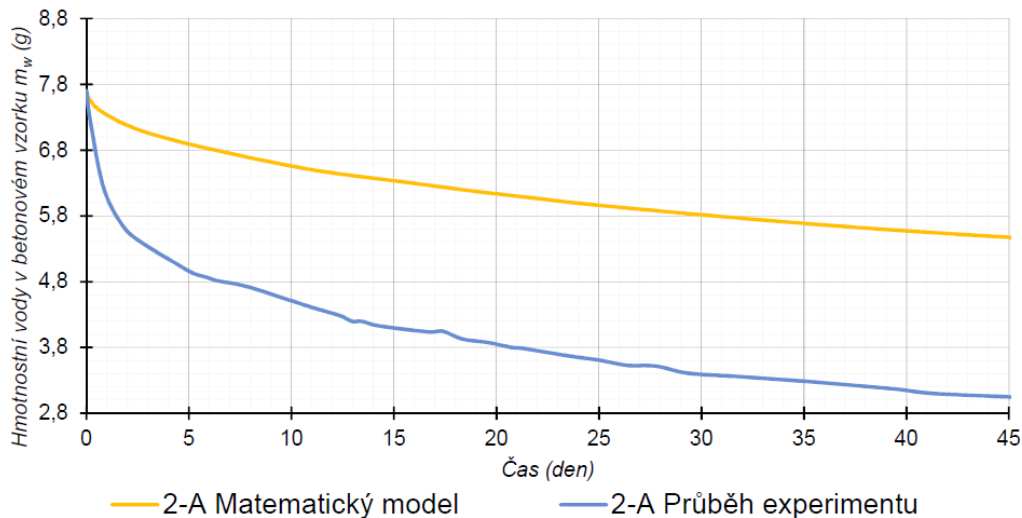


Graf 3.3.2-2: Relativní vlhkost a teplota vzduchu v průběhu experimentu

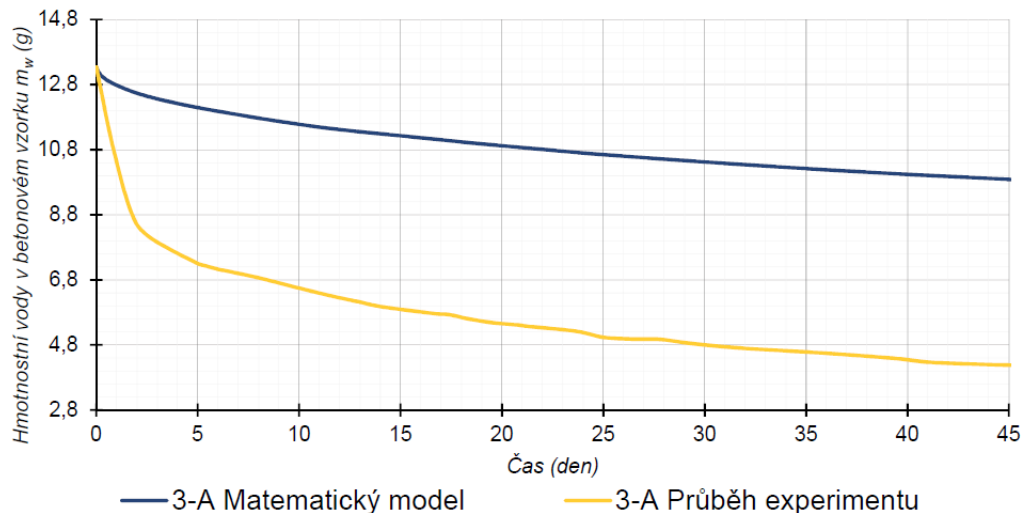
Simulace v matematickém modelu byla provedena s časovým krokem  $h = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$ . Sledovanou výstupní hodnotou byla hmotnost vody v betonu  $m_w$  (g). Porovnání naměřených hodnot z provedeného experimentu a výsledků ze simulace v matematickém modelu znázorňují Graf 3.3.2-3 až Graf 3.3.2-5.



Graf 3.3.2-3: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 1-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu



Graf 3.3.2-4: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 2-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu



Graf 3.3.2-5: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 3-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu

### b) První kalibrace matematického modelu na základě srovnání výsledků simulace s provedeným experimentem

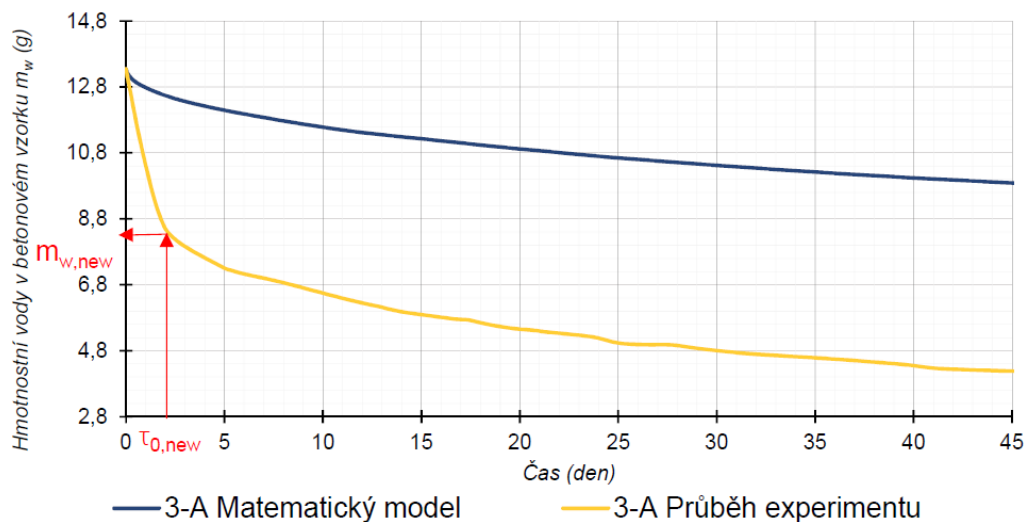
Z grafů jde vidět, že naměřený průběh hmotností se značně liší od simulace v matematickém modelu. Největších odchylek bylo dosaženo u vzorku směsi III 3-A. Jedná se o směs s největším vodním součinitelem  $v = 1,1 (-)$ . Naopak nejmenších odchylek dosahuje vzorek směsi I 1-A, s nejmenším vodním součinitelem  $v = 0,5 (-)$ .

Jde vidět, že odchylky vznikají především v prvních dnech experimentu, kdy je úbytek hmotnosti vzorků velmi strmý a téměř lineární. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena tím, že matematický model simuluje odpar vody z otevřených pórů betonu. V prvních dnech tuhnutí betonu však dochází k odparu přebytečné záměsové vody, nikoliv



vody z pórovité struktury betonu. Nepochází tak ani k prosychání pórovité struktury a tím ke zpomalování odparu vody. Tomu odpovídá lineární průběh hmotnostní křivky v těchto dnech experimentu. Je tedy patrné, že odhad otevřené pórovitosti  $\phi_o$  z množství vody na počátku experimentu  $m_{w,0}$  provedený v kapitole 2.3.3 byl chybný a je potřeba jej upravit.

Z průběhu hmotnostní křivky byl tedy stanoven čas  $\tau_{0,new}$  (hod), kdy končí lineární průběh hmotnostní křivky a začíná vysychat pórovitá struktura betonu. Stanovení tohoto času znázorňuje Graf 3.3.2-6.



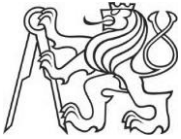
Graf 3.3.2-6: Stanovení času experimentu, kdy začíná docházet k odparu vody z pórovité struktury betonu

Z obsahu vody ve vzorku  $m_{w,new}$  (g) v tomto čase byla odhadnuta nová hodnota otevřené pórovitosti  $\phi_{o,new}$  (-) způsobem užitým v kapitole 2.3.3. Upravené hodnoty znázorňuje Tabulka 3.3.2-2.

Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$m_{w,0}$ (g)	7	8	7	8	8	8	13	13	14
$\tau_{0,new}$ (hod)	20	5	20	20	20	20	62	62	62
$m_{w,0,new}$ (g)	6	7	5	6	7	6	8	8	8
$\Phi_{o,new}$ (-)	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,08	0,08	0,09
$\Phi_{o,průměr,new}$ (-)	0,06			0,07			0,09		

Tabulka 3.3.2-2: Upravené hodnoty otevřené pórovitosti jednotlivých vzorků

Dále byla do matematického modelu zavedena simulace vysychání vody z betonové podlahy v prvních dnech tuhnutí, než je dosaženo času  $\tau_{0,new}$ . V této fázi vysychání dochází k odparu přebytečné záměsové vody z povrchu betonové podlahy, což



Ize přirovnat k odparu vody z volné hladiny. Hustota toku vodní páry mezi vodní hladinou a vzduchem  $g_{vk}$  je rovna:

$$g_{vk} = \frac{\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}}{Z_{v,si}} \quad \left(\frac{kg}{m^2s}\right) \quad (37)$$

Kde  $\rho_{v,sat}$  ( $kg/m^3$ ) je koncentrace nasycené vodní páry,  $\rho_{v,i}$  ( $kg/m^3$ ) koncentrace vodních par okolního vzduchu a  $Z_{v,si}$  ( $s/m$ ) je odpor při přestupu vlhkosti z betonové podlahy do okolního prostoru. Odpor byl zjištěn postupným dosazováním do matematické simulace a porovnáváním výsledků s naměřeným průběhem vysychání v prvních dnech experimentu. Byla zjištěna hodnota odporu při přestupu vlhkosti  $Z_{v,si} = 700 s/m$ . Jedná se o hodnotu téměř dvakrát vyšší než při odparu vody z volné hladiny. To odpovídá tomu, že odpar z povrchu betonu bude pomalejší než z volné hladiny.

Dosazením hustoty toku vodní páry  $g_{vk}$  do vlhkostní bilance popsané rovnicí (18) uvedené v kapitole 3.2.1 dostáváme vztah:

$$\frac{dm_w}{d\tau} + g_{vk}A = 0 \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (38)$$

Kde  $A$  ( $m^2$ ) je plocha betonové podlahy a  $dm_w$  ( $kg$ ) je změna hmotnosti vody v betonu za čas  $\tau$  ( $s$ ). Využijeme numerického řešení této diferenciální rovnice a derivaci hmotnosti podle času nahradíme rozdílem hmotnosti vody v betonu  $m_{w,i}$  na počátku a na konci časového kroku  $h$  ( $s$ ):

$$\frac{dm_w}{d\tau} \approx \frac{m_{w,i}^{new} - m_{w,i}^{old}}{h} \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (39)$$

Po dosazení do rovnice (38) dostáváme:

$$\frac{m_{w,i}^{new} - m_{w,i}^{old}}{h} = -\frac{\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}}{Z_{v,si}}A \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (40)$$

Numerickým řešením diferenciální rovnice tedy je vztah:

$$m_{w,i}^{new} = m_{w,i}^{old} - \frac{\rho_{v,sat} - \rho_{v,i}}{Z_{v,si}}A \cdot h \quad (kg) \quad (41)$$

Toto řešení bylo doplněno do matematického modelu vysychání a je využito pro simulaci vysychání betonu v prvních dnech po vybetonování. Když hmotnost vody v betonu klesne pod hodnotu odpovídající nasycené pórovité struktuře betonu  $\phi_{o,new}$  (-),



je opět užitý původní výpočet s užitím rovnice (26) popisující difuzi vodní páry v pórovité struktuře betonu.

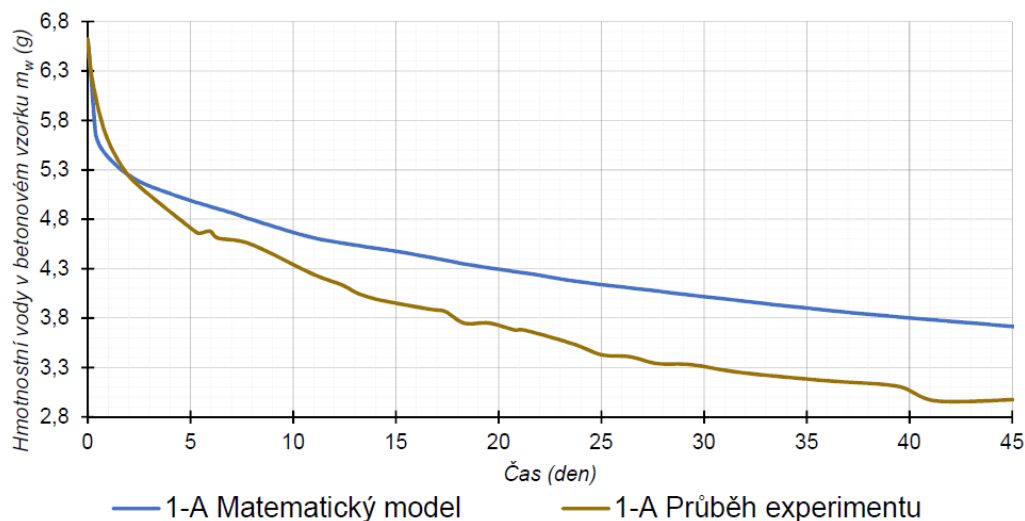
### c) Simulace v matematickém modelu po první kalibraci

Vstupní data simulace byla zadána shodně s první simulací v kapitole 3.3.2a), až na hodnotu otevřené pórovitosti, jež byla upravena v kapitole 3.3.2b) a shrnuje ji Tabulka 3.3.2-3.

Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$m_{w,0}$ (g)	7	8	7	8	8	8	13	13	14
$\Phi_{o,new}$ (-)	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,08	0,08	0,09

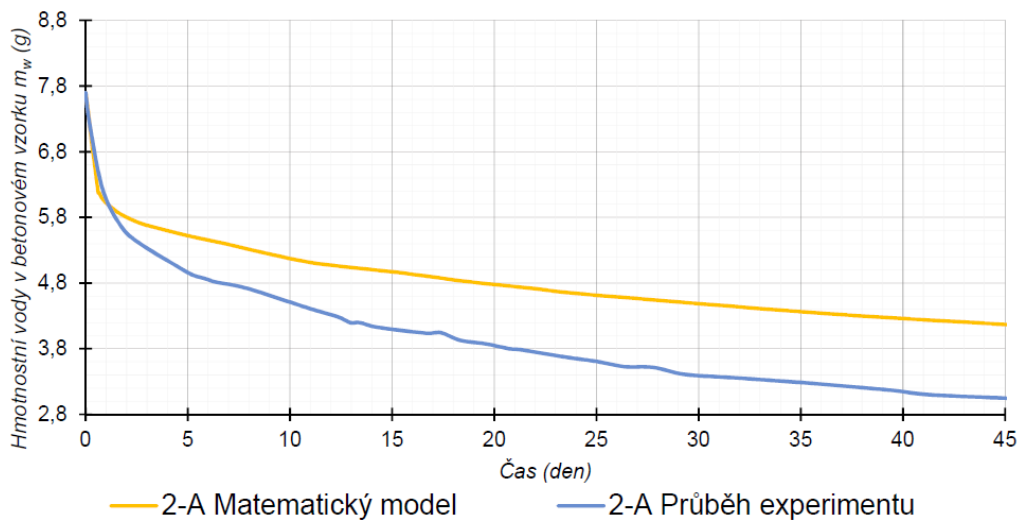
Tabulka 3.3.2-3: Upravené hodnoty otevřené pórovitosti jednotlivých vzorků

Simulace v matematickém modelu byla provedena s časovým krokem  $h = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$ . Sledovanou výstupní hodnotu byla hmotnost vody v betonu  $m_w$  (g). Porovnání naměřených hodnot z provedeného experimentu a výsledků ze simulace v matematickém model znázorňuje Graf 3.3.2-7 až Graf 3.3.2-9.

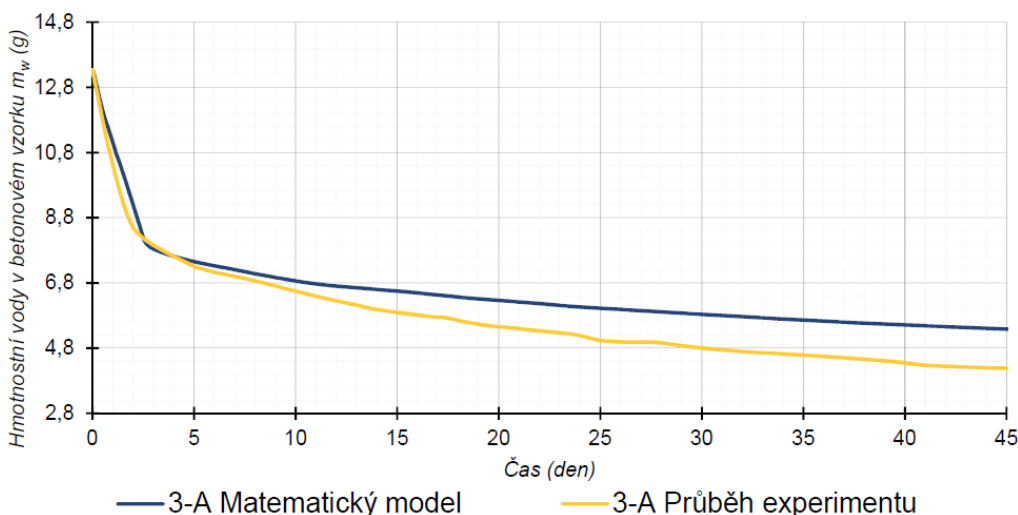


Graf 3.3.2-7: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 1-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu





Graf 3.3.2-8: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 2-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu



Graf 3.3.2-9: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 3-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu

#### d) Druhá kalibrace matematického modelu na základě srovnání výsledků simulace s provedeným experimentem

Z uvedených grafů jde vidět, že simulace v matematickém modelu dosahuje stále odlišných hodnot od průběhu experimentu. Hmotnostní křivka ze simulace má obdobný průběh, avšak neklesá tak prudce, jako hmotnostní křivka z průběhu experimentu. Tento trend odpovídá odlišnému faktoru difuzního odporu betonu.

V simulaci je užit faktor difuzního odporu v závislosti na relativní vlhkosti vnitřního vzduchu. Tím dochází k zjednodušení, kdy předpokládáme, že vzduch v pórech, ze kterých již došlo k odparu vodní páry má shodnou relativní vlhkost jako interiérový vzduch. Jedná se o zjednodušení na straně bezpečnosti, jelikož tím dochází ke stejnému, či pomalejšímu odparu vody z betonové podlahy.



Jde však vidět, že toto zjednodušení je příliš konzervativní a způsobuje příliš velké odchylky. Byla tedy provedena další kalibrace matematického modelu. Faktor difuzního odporu jednotlivých betonových směsí byl užit konstantní o hodnotě naměřené při relativní vlhkosti vzduchu  $RH = 77,8 \%$  (podrobněji viz kapitola 2.3.5 Měření faktoru difuzního odporu). Zadané hodnoty shrnuje Tabulka 3.3.2-4.

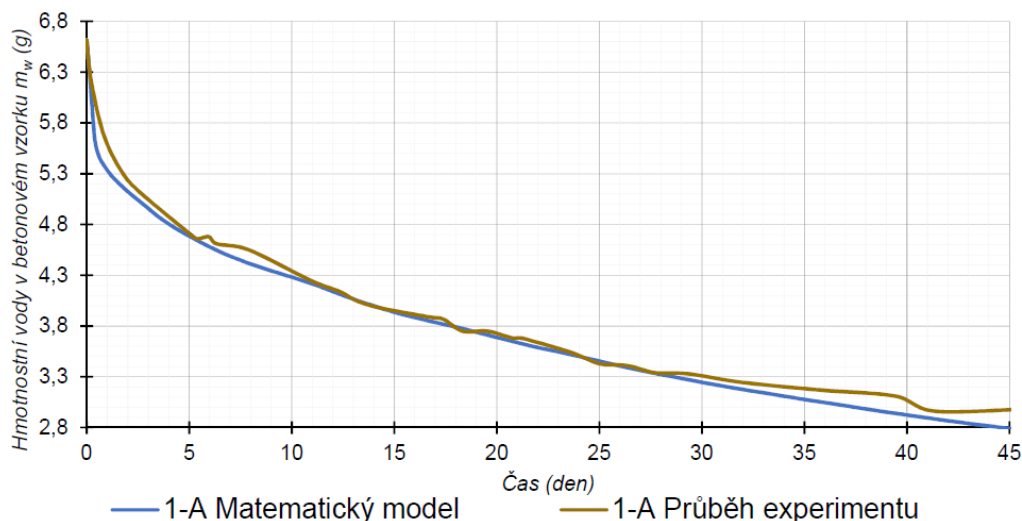
Betonová směs	Směs I			Směs II			Směs III		
Vzorek	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
$\mu_{bet} (-)$	33			31			22		

Tabulka 3.3.2-4: Naměřené hodnoty faktoru difuzního odporu při relativní vlhkosti 77,8 %

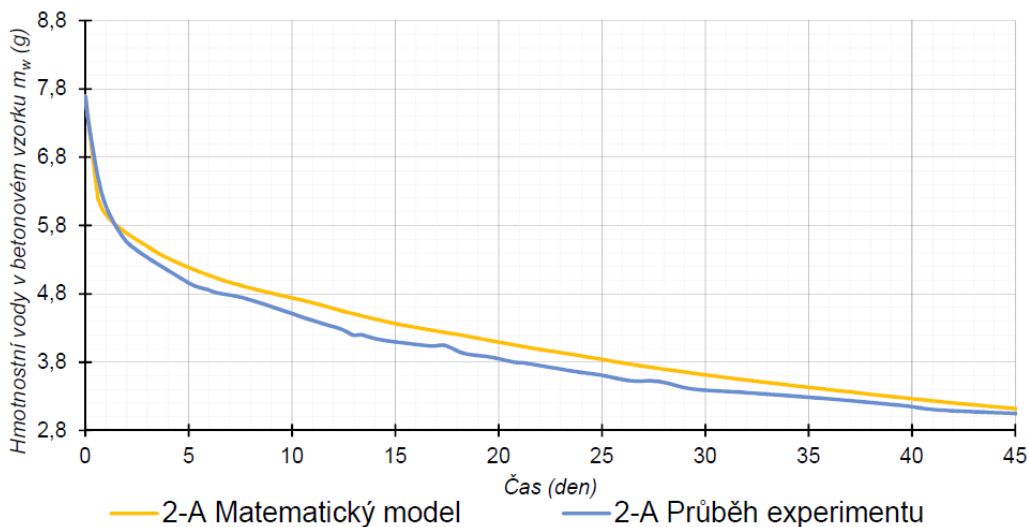
### e) Simulace v matematickém modelu po druhé kalibraci

Vstupní data simulace byla zadána shodně s druhou simulací v kapitole 3.3.2c), až na hodnotu faktoru difuzního odporu, jež byl upraven na hodnoty, jež uvádí Tabulka 3.3.2-4.

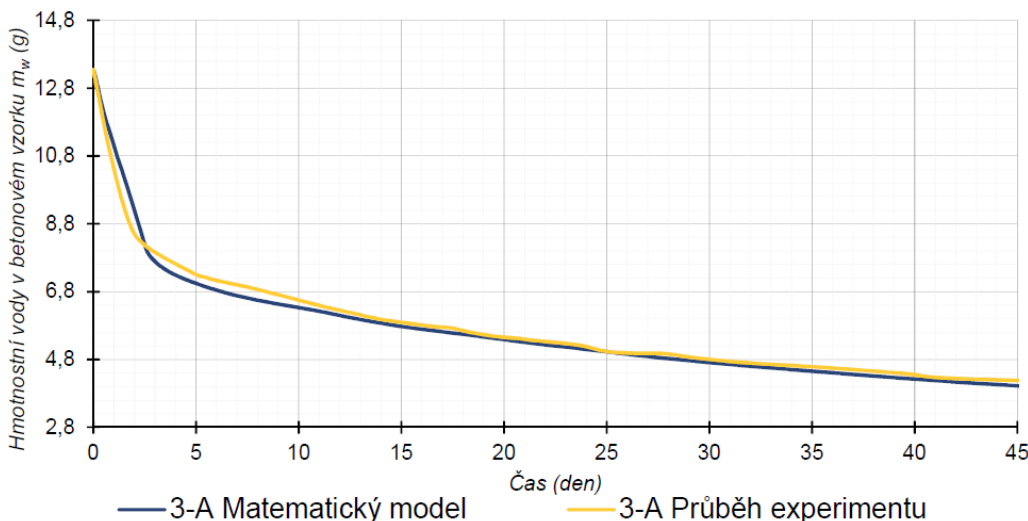
Simulace v matematickém modelu byla provedena s časovým krokem  $h = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$ . Sledovanou výstupní hodnotu byla hmotnost vody v betonu  $m_w (g)$ . Porovnání naměřených hodnot z provedeného experimentu a výsledků ze simulace v matematickém model znázorňuje Graf 3.3.2-10 až Graf 3.3.2-12.



Graf 3.3.2-10: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 1-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu



Graf 3.3.2-11: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 2-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu



Graf 3.3.2-12: Průběh hmotnosti vody ve vzorku 3-A ze simulace v matematickém modelu a z experimentu

Jde vidět, že s konstantní hodnotou faktoru difuzního odporu naměřenou při relativní vlhkosti  $RH = 77,8\%$  dosahují výsledky simulace hodnot blízkých výsledkům provedeného experimentu vysychání.

### 3.3.3 Závěry z validace matematického modelu

Matematický model byl validován s pomocí softwaru Wufi. Bylo zjištěno, že při simulaci vysychání jednovrstvé podlahy do okolního prostředí dosahují výsledky matematického modelu obdobných hodnot, jako výsledky ze softwaru Wufi. Při simulaci vysychání dvouvrstvé podlahy, kdy je betonová vrstva zakryta dřevěnou vrstvou, se výsledky matematického modelu liší o fázový posun způsobený akumulací vody ve dřevě.



Dále byl matematický model validován s pomocí experimentu vysychání provedeného v kapitole 2.4. Zde bylo nutno matematický model kalibrovat dvěma úpravami. Rozdělením simulace vysychání betonové podlahy do dvou fází, kdy v první fázi dochází pouze k odparu vody z povrchu betonové podlahy a v druhé fázi k difuzi vody z pórovité struktury betonu. Druhou úpravou byla kalibrace faktoru difuzního odporu. Ukázalo se, že v prvních 45 dnech vysychání odpovídá faktor difuzního odporu betonu hodnotám naměřeným při relativní vlhkosti  $RH = 77,8 \%$ . Po provedené kalibraci bylo dosaženo uspokojivých výsledků, které v prvních 45 dnech vysychání nedosahují výrazných odchylek od provedeného experimentu.

## 4 Případová studie vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby

### 4.1 Stanovení cílů případové studie

Na základě validace matematického modelu uvedené v kapitole 3.3 byla provedena případová studie vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby. Cílem této studie bylo stanovit, jaký vliv může mít úprava vnitřního prostředí budovy na proces vysychání a jakým způsobem může dojít k urychlení tohoto procesu. Bylo tak sledováno, po jaké době dojde k poklesu hmotnostní vlhkosti betonové podlahy na požadovanou hodnotu. Požadavek na hmotnostní vlhkost vychází z ČSN 74 4505 Podlahy – společná ustanovení [8] a uvádí jej Tabulka 4.1-1.

Nášlapná vrstva	Cementový potěr, beton	Potěr na bázi síranu vápenatého
Kamenná nebo keramická dlažba	5,0%	0,5%
Lité podlahoviny na bázi cementu	5,0%	Nelze provádět
Syntetické lité podlahoviny	4,0%	0,5%
Paropropustná textilie	5,0%	1,0%
PVC, linoleum, guma, korek	3,5%	0,5%
Dřevěné podlahy, parkety, laminátové podlahoviny	2,5%	0,5%

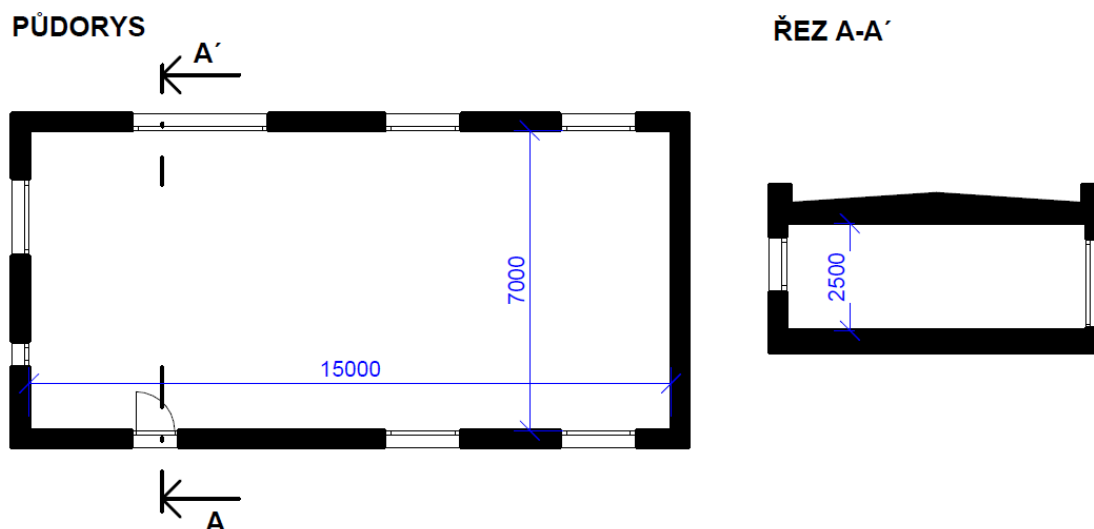
Tabulka 4.1-1: Nejvyšší dovolená vlhkost betonu v době pokládky nášlapné vrstvy

Pro potřeby simulace byl využit požadavek pro hmotnostní vlhkost betonu v době pokládky dřevěné podlahy. Tedy požadovaná hmotnostní vlhkost činí  $w_{h,end} = 2,5 \%$ .



## 4.2 Vstupní hodnoty případové studie

Případová studie simuluje vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby. Byla tedy uvažována modelová dřevostavba rodinného domu o půdorysných rozměrech  $15 \times 7 \text{ m}$  a světlé výšce  $2,5 \text{ m}$ . Schématický půdorys a řez modelovou budovou znázorňuje Obrázek 4.2-1.



Obrázek 4.2-1: Schématický půdorys a řez modelovou budovou

Průměrný součinitel prostupu tepla obvodových konstrukcí  $U_{průměr}$  ( $W/(m^2K)$ ) byl stanoven dle požadavků ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky [9] jako hodnota, jež nesmí být překročena pro obytné budovy. Plochu podlahy  $A_{podlahy}$  ( $m^2$ ), objem vzduchu  $V_{a,i}$  ( $m^3$ ), celkovou plochu obvodových konstrukcí  $A_{konstrukcí}$  ( $m^2$ ) a průměrný součinitel prostupu tepla  $U_{průměr}$  ( $W/(m^2K)$ ) znázorňuje Tabulka 4.2-1.

Parametry obálky budovy	
$A_{podlahy}$ ( $m^2$ )	105
$V_{a,i}$ ( $m^3$ )	263
$A_{konstrukcí}$ ( $m^2$ )	320
$U_{průměr}$ ( $W/(m^2K)$ )	0,5

Tabulka 4.2-1: Parametry modelové budovy

Vlastnosti betonové podlahy byly zadány shodně s naměřenými vlastnostmi betonové směsi II, jež byly změřeny a popsány v kapitole 2.3 Laboratorní měření a následně kalibrovány v kapitole 3.3 Validace matematického modelu. Shrnuje je Tabulka



4.2-2. Hmotnost vody v betonové podlaze na počátku vysychání  $m_{w,0,bet}$  byla přepočtena na krychlový metr podlahy vztahem:

$$m_{w,0,bet} = \frac{m_{w,0}}{V_v} \quad (kg) \quad (42)$$

Kde  $m_{w,0}$  (kg) je hmotnost vody v betonovém vzorku a  $V_v$  ( $m^3$ ) objem vzorku. Tyto hodnoty jsou uvedeny v kapitole 2.3.3.

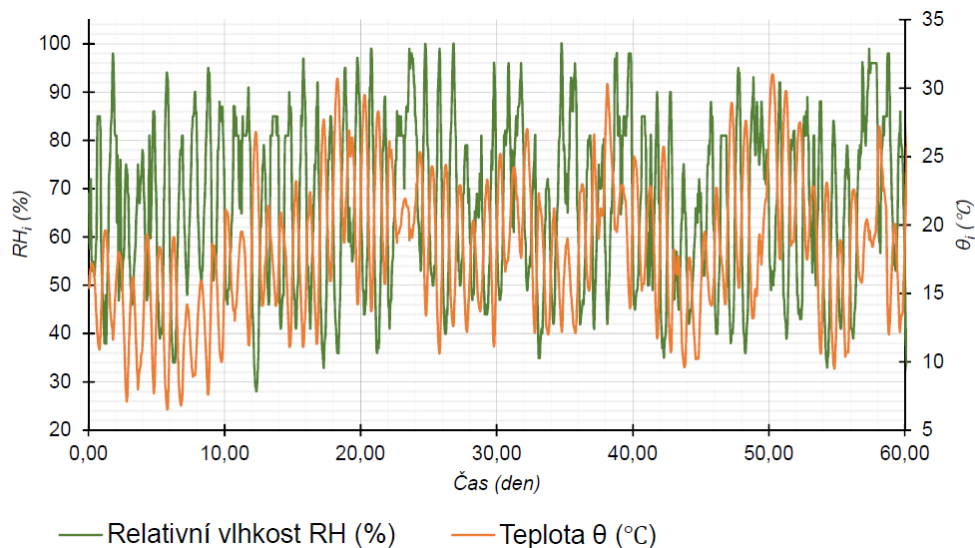
Naměřené hodnoty	$v$ (-)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$m_{w,0,bet}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Phi_{o,new}$ (-)	$\mu$ (-)
Směs II	0,7	2079	83	0,07	31

Tabulka 4.2-2: Vlastnosti betonu

## 4.3 Případová studie pro letní období

### 4.3.1 Okrajové podmínky

Za parametry vnějšího vzduchu byly dosazeny hodnoty z knihovny softwaru WUFI 5. Jedná se o hodnoty naměřené na hydrometeorologické stanici Praha-Libuš v hodinových intervalech. Začátek simulace byl stanoven na den 1. června v 10:00 hodin. Graf 4.3.1-1 znázorňuje průběh teploty vnějšího vzduchu  $\theta_e$  (°C) a relativní vlhkosti vnějšího vzduchu  $RH_e$  (%) pro 60 dní simulace.



Graf 4.3.1-1: Vlastnosti vnějšího vzduchu

Počáteční teplota vnitřního vzduchu byla zadána jako  $\theta_i = 20$  °C a počáteční relativní vlhkosti vnitřního vzduchu  $RH_i = 50$  %.



Případová studie byla zpracována ve variantách, kdy proměnným parametrem byla násobnost větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) a výkon vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ).

#### 4.3.2 Vypočtené hodnoty

Výpočet byl proveden s časovým krokem  $h = 1 \text{ hod} = 3600 \text{ s}$ . Sledovanou výstupní hodnotu byla hmotnostní vlhkost vody v betonu  $W_h$  (% hm.) stanovená vztahem:

$$w_h = \frac{m_w}{m_d} \quad (\% \text{ hm.}) \quad (43)$$

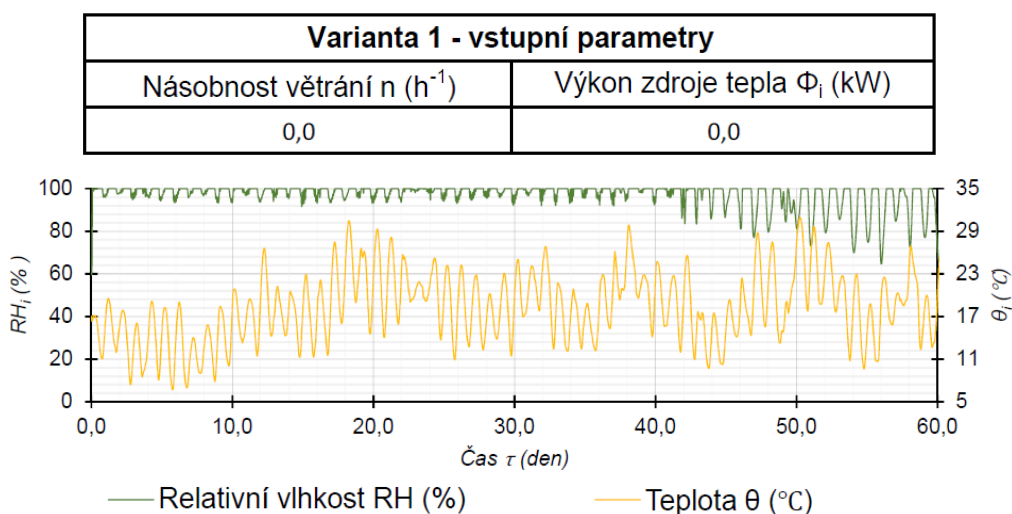
Kde  $m_w$  ( $g$ ) je hmotnost vody ve vzorku a  $m_d$  ( $g$ ) je hmotnost suchého vzorku stanovená z objemové hmotnosti suchého betonu  $\rho_d$  ( $kg/m^3$ ), plochy betonu  $A_{podlahy}$  ( $m^2$ ) a výšky betonové vrstvy  $H = 0,6 \text{ m}$ , jež uvádí kapitola 4.2 Vstupní hodnoty případové studie. Po úpravě dostáváme vztah:

$$w_h = \frac{m_w}{\rho_d \cdot H \cdot A_{podlahy}} \quad (\% \text{ hm.}) \quad (44)$$

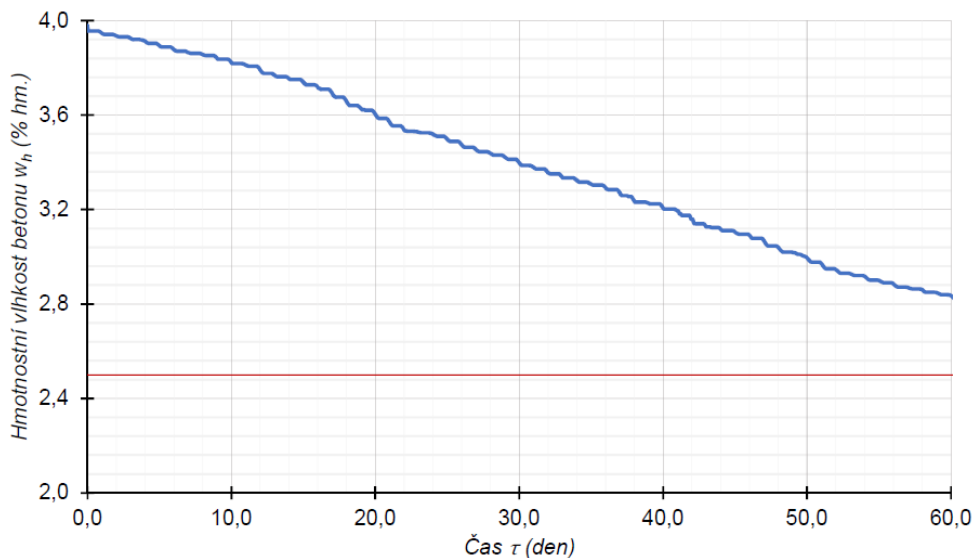
##### a) Varianta 1 nevětraná a nevytápěná budova

V první variantě byla hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) i hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ) rovny nule.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.3.2-1. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňuje Graf 4.3.2-2. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% \text{ hm.}$



Graf 4.3.2-1: Varianta 1 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



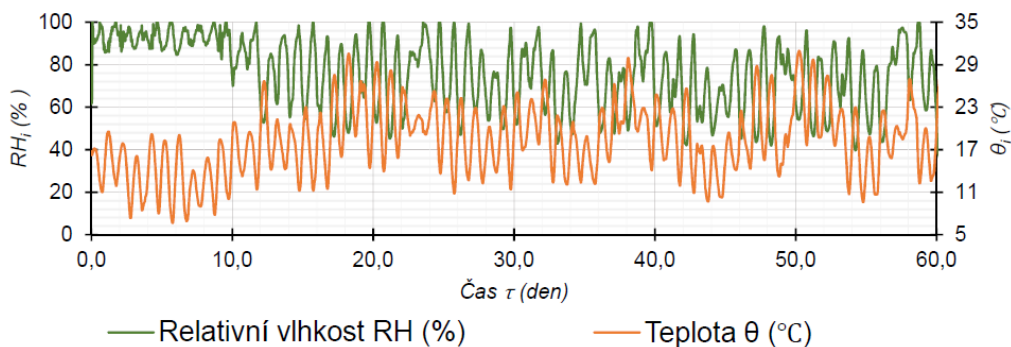
Graf 4.3.2-2: Varianta 1 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

### b) Varianta 2 větraná a nevytápěná budova

V druhé variantě byla zvýšena hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ), avšak hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ) byla rovna nule.

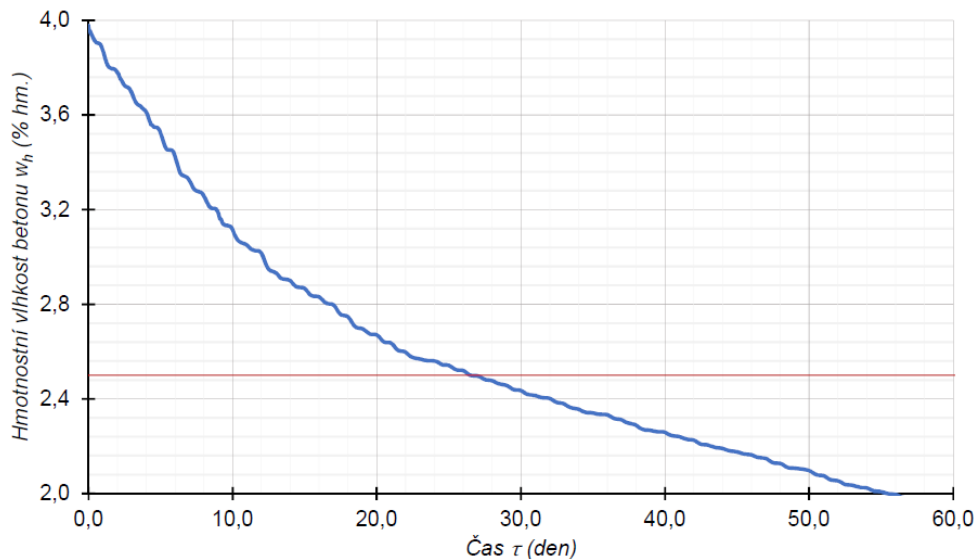
Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.3.2-3. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňuje Graf 4.3.2-4. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 2 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
0,5	0,0



Graf 4.3.2-3: Varianta 2 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



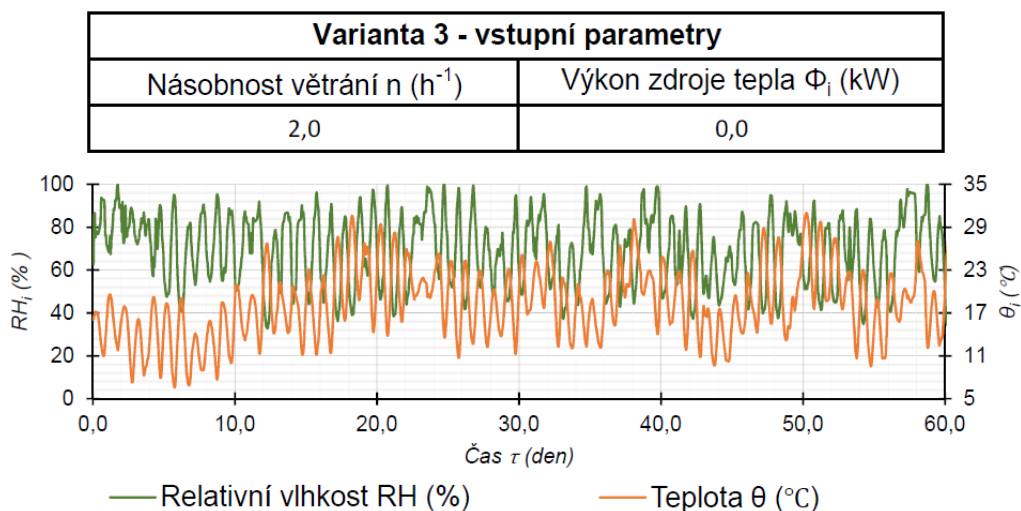


Graf 4.3.2-4: Varianta 2 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

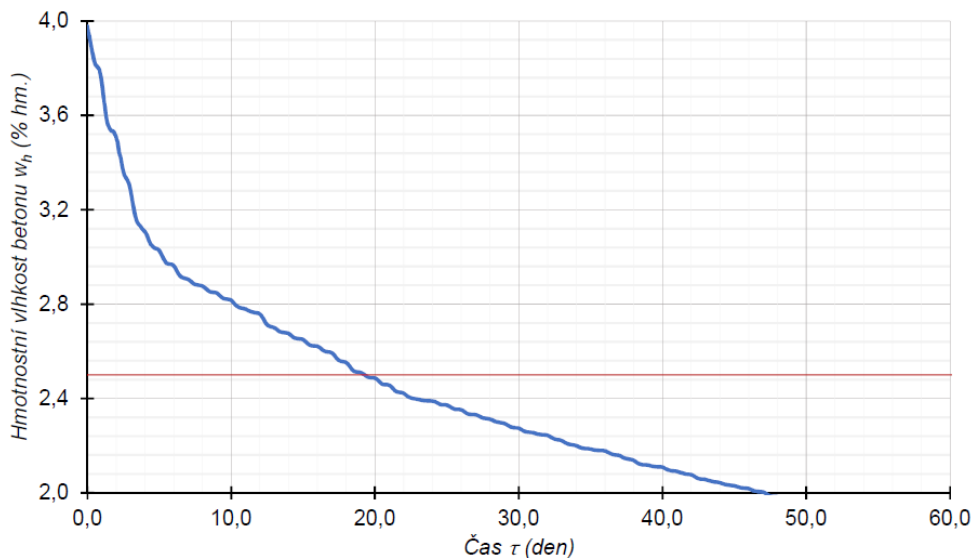
### c) Varianta 3 velmi větraná a nevytápěná budova

Ve třetí variantě byla ještě navýšena hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) a hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ) byla rovna nule.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.3.2-5. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňuje Graf 4.3.2-6. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$



Graf 4.3.2-5: Varianta 3 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



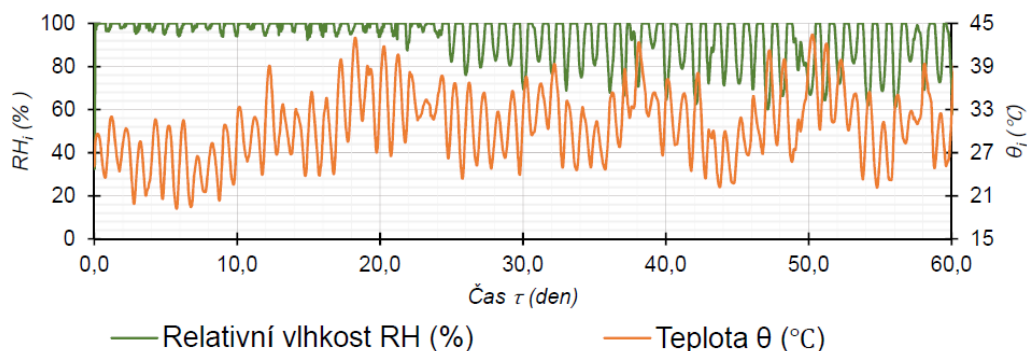
Graf 4.3.2-6: Varianta 3 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

#### d) Varianta 4 nevětraná a vytápěná budova

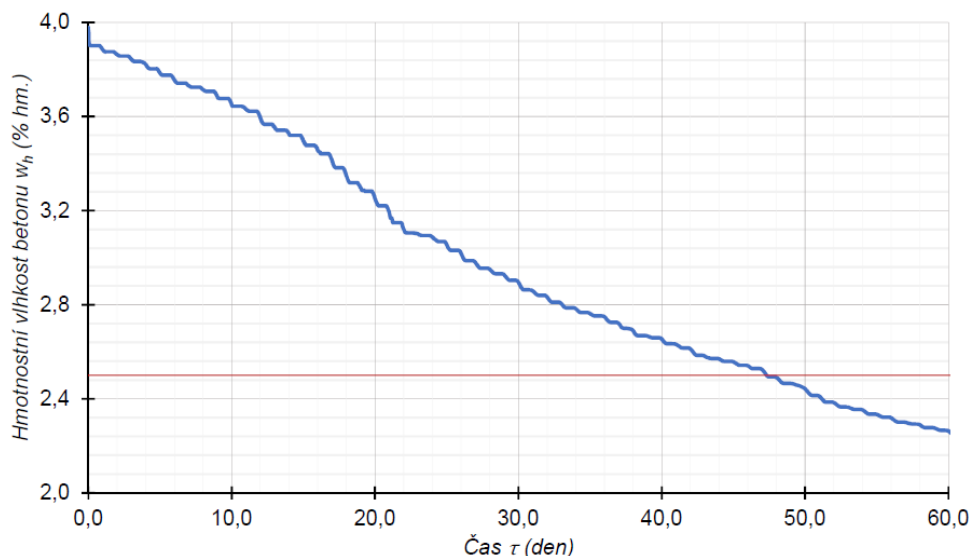
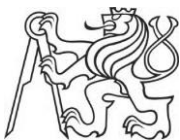
Ve čtvrté variantě byla zvýšena hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W) a násobnost větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) byla rovna nule.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.3.2-7. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňují Graf 4.3.2-8. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 4 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
0,0	2,0



Graf 4.3.2-7: Varianta 4 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



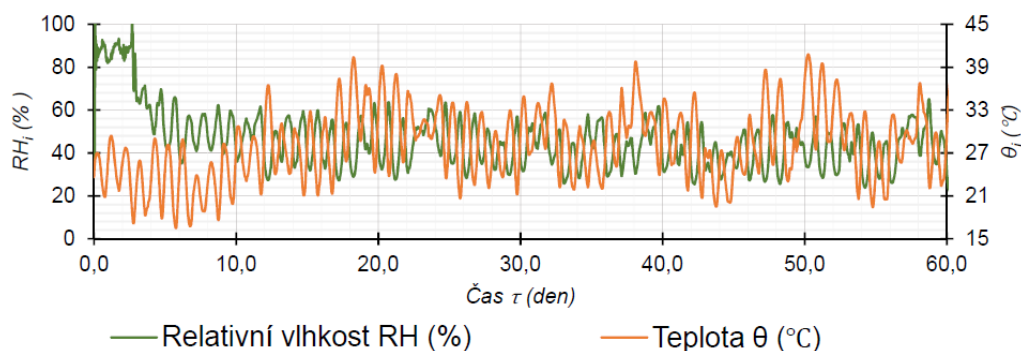
Graf 4.3.2-8: Varianta 4 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

### e) Varianta 5 větraná a vytápěná budova

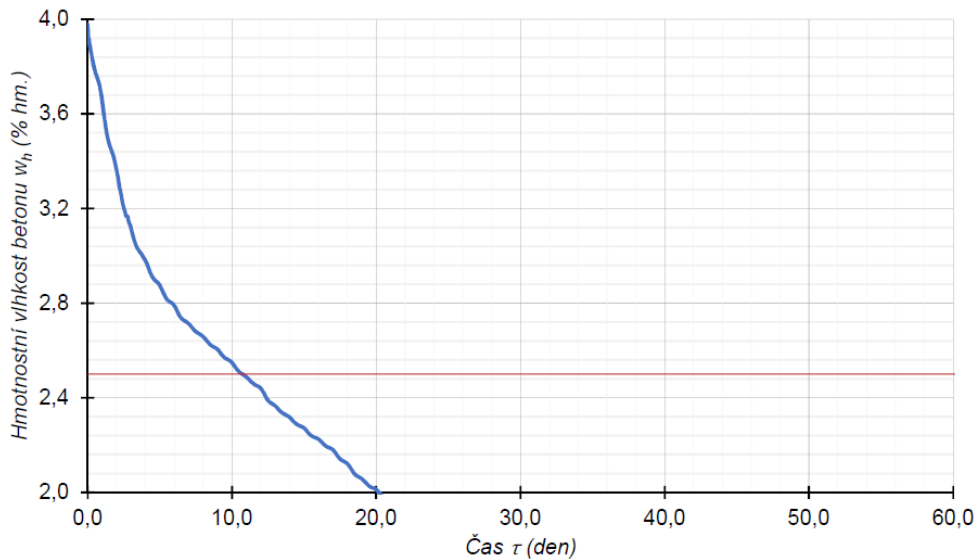
V páté variantě byla zvýšena hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W) i hodnota násobnost větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ).

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.3.2-9. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňují Graf 4.3.2-10. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 5 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
0,5	2,0



Graf 4.3.2-9: Varianta 5 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



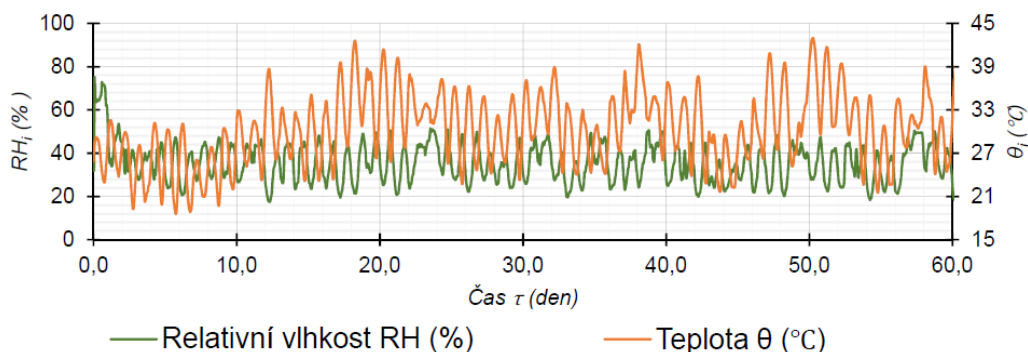
Graf 4.3.2-10: Varianta 5 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

#### f) Varianta 6 velmi větraná a velmi vytápěná budova

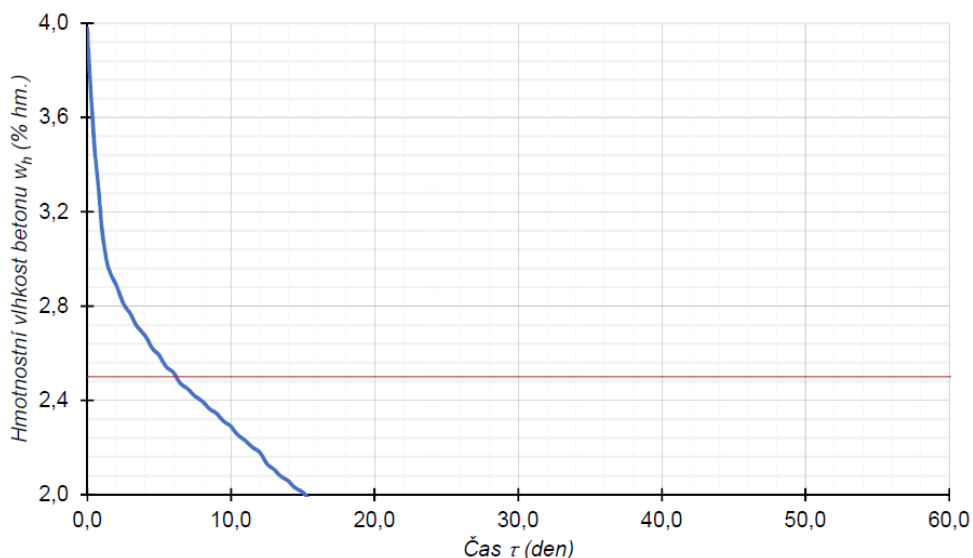
V šesté variantě byla oproti předchozí navýšena hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W) i hodnota násobnost větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) na vyšší hodnoty.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.3.2-11. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňují Graf 4.3.2-12. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 6 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
2,0	4,0



Graf 4.3.2-11: Varianta 6 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



Graf 4.3.2-12: Varianta 6 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

### 4.3.3 Vyhodnocení

Vypočtené hodnoty z kapitoly 4.3.2 Vypočtené hodnoty shrnuje Tabulka 4.3.3-1. Byl stanoven čas simulace  $\tau_{w,fin}$  (den), ve kterém hodnota hmotnostní vlhkosti betonové podlahy  $w_h$  (% hm.) klesla pod požadovanou hodnotu 2,5 %. Z tabulky jsou patrné také zvolené hodnoty násobnosti výměny vzduchu  $n$  ( $h^{-1}$ ) a výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W) v jednotlivých variantách. Pro názornost byla hodnota výkonu tepla přepočtena na cenu za vytápění v prvních 60 dnech simulace s uvažovanou sazbou 1,35 Kč/kWh. Dále byla vypočtena průměrná teplota vnitřního vzduchu  $\theta_i$  ( $^{\circ}C$ ) v prvních 60 dnech simulace. V těchto dnech byl navíc sledován počet hodinových kroků simulace, kdy relativní vlhkost vnitřního vzduchu dosáhla 100 %.

Varianta	1	2	3	4	5	6
Násobnostvětrání $n$ ( $h^{-1}$ )	0,0	0,5	2,0	0,0	0,5	2,0
Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	4,0
Odhad nákladů vytápění (Kč)	0	0	0	3890	3890	7780
Průměrná vnitř. teplota $\theta_i$ ( $^{\circ}C$ )	18,3	18,3	18,3	30,8	28,1	30,3
Počet dosažení $RH_i = 100$ %	798x	30x	2x	632x	3x	0x
Požadavek hm. vlhkosti $w_h$ (% hm.)	2,5					
Čas vyschnutí betonu $\tau_{w,fin}$ (den)	87	26	19	47	11	6

Tabulka 4.3.3-1: Vyhodnocení vysychání betonových podlah v různých variantách



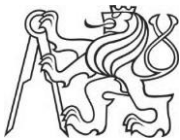
Je zřejmé, že varianta 1, kdy v simulaci nedocházelo ani k větrání budovy a vnitřní vzduch nebyl nějak ohříván, vykazuje nejhorší výsledek. Dochází k velmi častému nasycení vnitřního vzduchu vodní parou vypařenou z betonové podlahy. Betonová podlaha tak vysychá pouze skokově, když dojde k nárůstu teploty uvnitř budovy a vnitřní vzduch je tak opět schopen pojmout odpařenou vodní páru z betonu, než dojde k opětovnému nasycení. Z výsledků je zřejmé, že v budově bude docházet k rozsáhlé kondenzaci vodní páry na obvodových konstrukcích, což je pro dřevostavbu velmi nežádoucí efekt. Může dojít k intenzivní sorpci vody do dřevěných konstrukcí a k následnému vzniku plísní a degradaci dřevěných materiálů.

Ve variantách 2 a 3 byla postupně navyšována hodnota násobnosti větrání. Z výsledků simulace vyplývá, že toto opatření má příznivý efekt. Je však vidět, že ve variantě 2 dochází v prvních dnech výpočtu rovněž k nasycení vnitřního vzduchu vodní parou. Násobnost větrání  $n = 0,5 h^{-1}$  užitá v této variantě tedy není dostatečná, alespoň v prvních dnech vysychání je třeba ji zvýšit.

Ve variantě 4 bylo uvažováno pouze s vytápěním budovy bez větrání. Výsledky simulace opět ukazují velmi časté nasycení vnitřního vzduchu vodní parou a tím dochází také k prodloužení doby vysychání. Tato varianta se tedy ukazuje jako nepříznivá.

Ve variantách 5 a 6 byla zvolena kombinace větrání i vytápění a výsledky simulace ukazují velmi příznivé výsledky. Ve variantě 5 sice dochází k nárůstu relativní vlhkosti vnitřního vzduchu v prvních dnech vysychání, ale vlivem vytápění je vzduch zároveň ohříván a téměř nedochází k nasycení vzduchu vodní parou a tím ke kondenzaci.

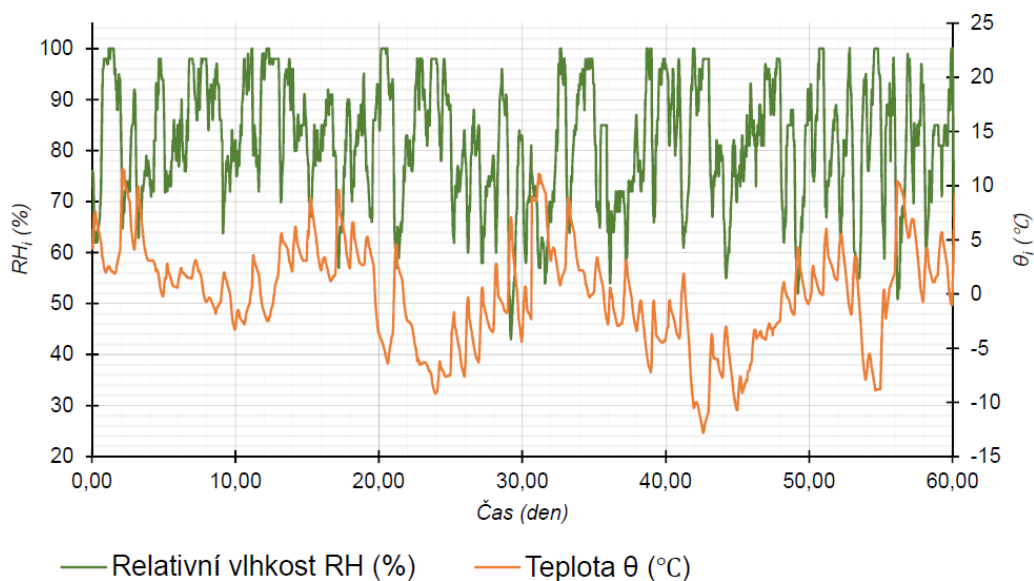
Z provedené simulace šesti variant vysychání betonové podlahy do dřevostavby lze učinit závěr, že pro urychlení vysychání betonové podlahy v letních měsících je účinné navýšení hodnoty větrání. Ukazuje se, že větrání do hodnoty  $n = 0,5 h^{-1}$  bez přitápění vnitřního vzduchu není dostatečné a dochází při něm k nasycení vodních par ve vnitřním vzduchu a k nežádoucí kondenzaci vody na okolních konstrukcích. Jako nejúčinnější se ukázala kombinace intenzivního větrání a vytápění budovy, kdy hmotnostní vlhkost betonové podlahy klesla pod požadovanou hodnotu již po 6 dnech.



## 4.4 Případová studie pro zimní období

### 4.4.1 Okrajové podmínky

Za parametry vnějšího vzduchu byly dosazeny hodnoty z knihovny softwaru WUFI 5. Jedná se o hodnoty naměřené na hydrometeorologické stanici Praha-Libuš v hodinových intervalech. Začátek simulace byl stanoven na 1. prosince v 10:00 hodin. Graf 4.4.1-1 znázorňuje průběh teploty vnějšího vzduchu  $\theta_e$  (°C) a relativní vlhkosti vnějšího vzduchu  $RH_e$  (%) pro 60 dní simulace.



Graf 4.4.1-1: Parametry vnějšího vzduchu

Počáteční teplota vnitřního vzduchu byla zadána jako  $\theta_i = 15$  °C a počáteční relativní vlhkosti vnitřního vzduchu  $RH_i = 50$  %.

Případová studie byla zpracována ve variantách, kdy proměnným parametrem byla násobnost větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) a výkon vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W).

### 4.4.2 Vypočtené hodnoty

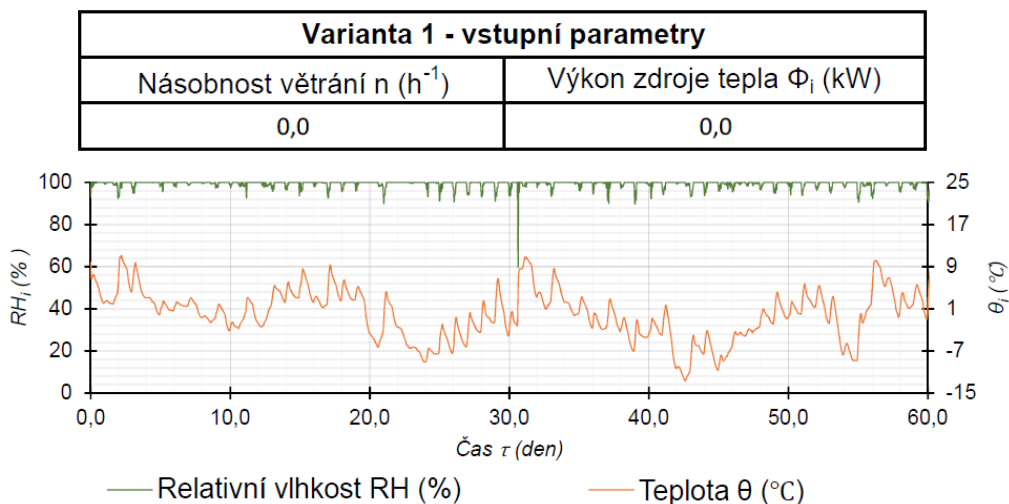
Výpočet byl proveden s časovým krokem  $h = 1$  hod = 3600 s. Sledovanou výstupní hodnotu byla hmotnostní vlhkost vody v betonu  $W_h$  (% hm.) stanovená rovnicí (44).

#### a) Varianta 1 nevětraná a nevytápěná budova

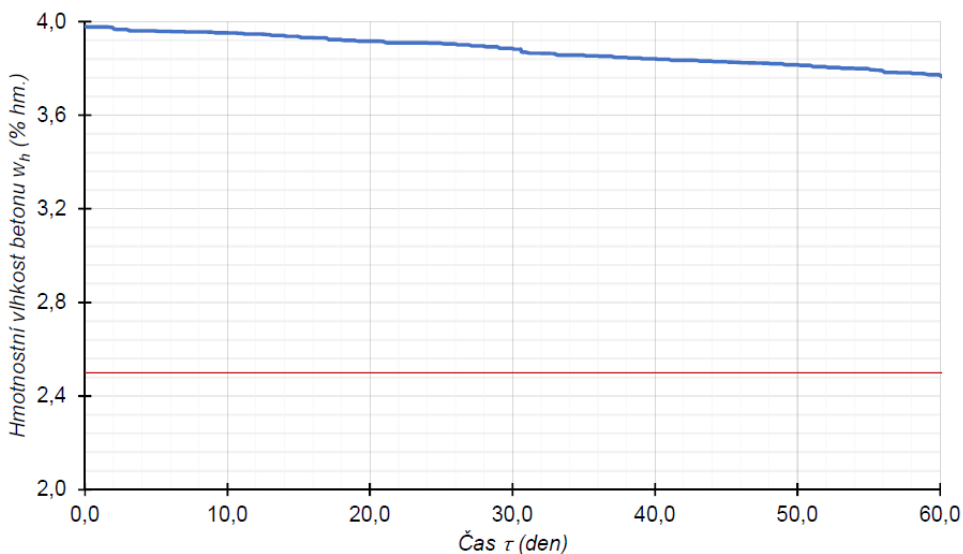
V první variantě byla hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) i hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W) rovny nule.



Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.4.2-1. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňuje Graf 4.4.2-2. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$



Graf 4.4.2-1: Varianta 1 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



Graf 4.4.2-2: Varianta 1 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

## b) Varianta 2 větraná a nevytápěná budova

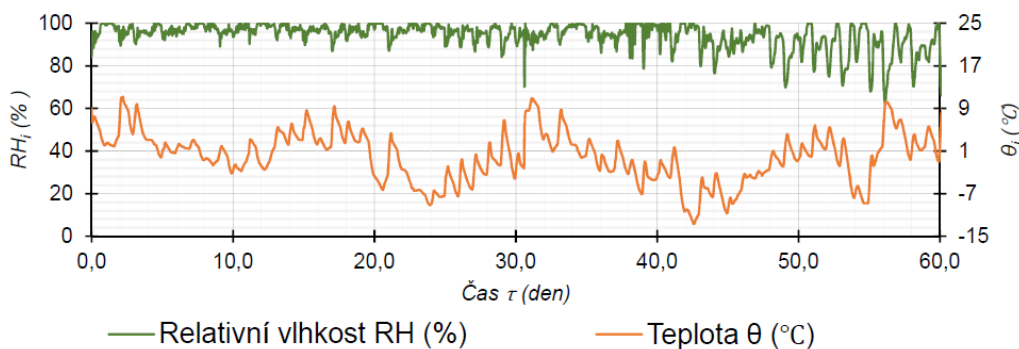
V druhé variantě byla zvýšena hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ), avšak hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ) byla rovna nule.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.4.2-3. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňuje Graf 4.4.2-4. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

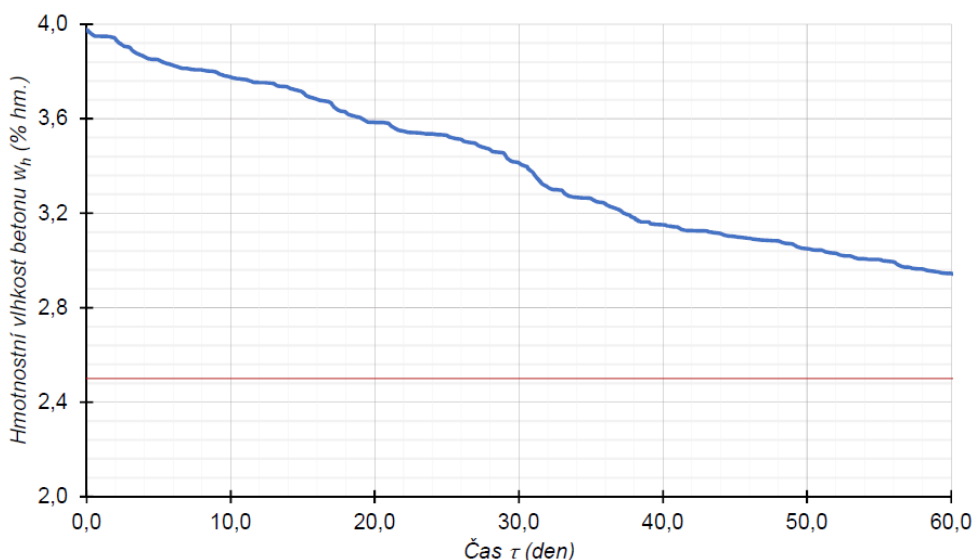




Varianta 2 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
0,5	0,0



Graf 4.4.2-3: Varianta 2 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



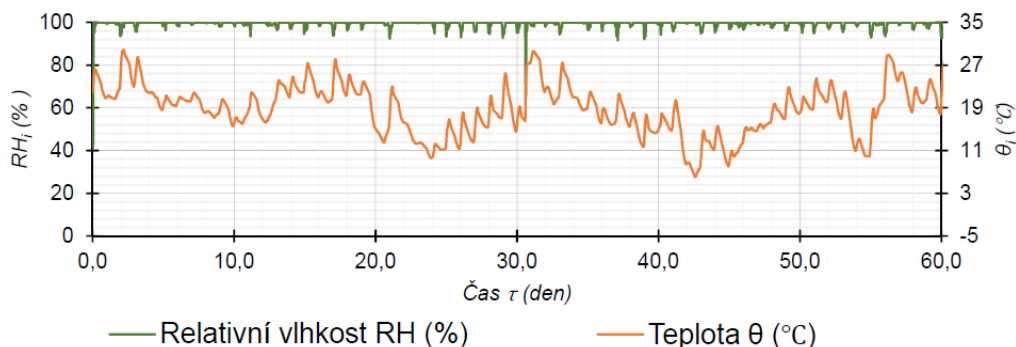
Graf 4.4.2-4: Varianta 2 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

### c) Varianta 3 nevětraná a vytápěná budova

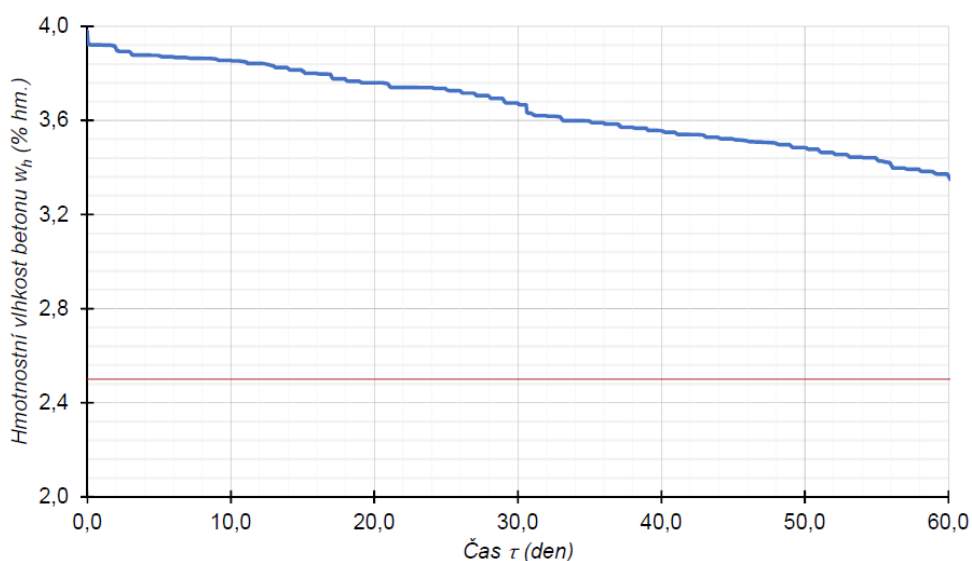
Ve třetí variantě byla zvýšena hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ), avšak násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) byla rovna nule.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.4.2-5. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňuje Graf 4.4.2-6. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 3 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
0,0	3,0



Graf 4.4.2-5: Varianta 3 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



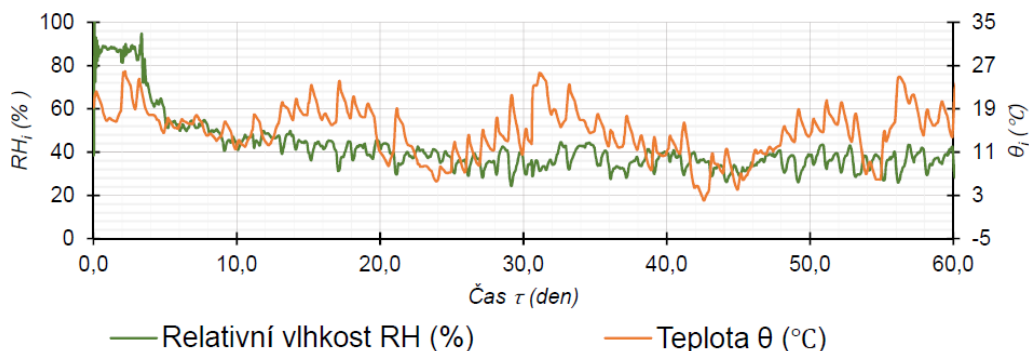
Graf 4.4.2-6: Varianta 3 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

#### d) Varianta 4 větraná a vytápěná budova

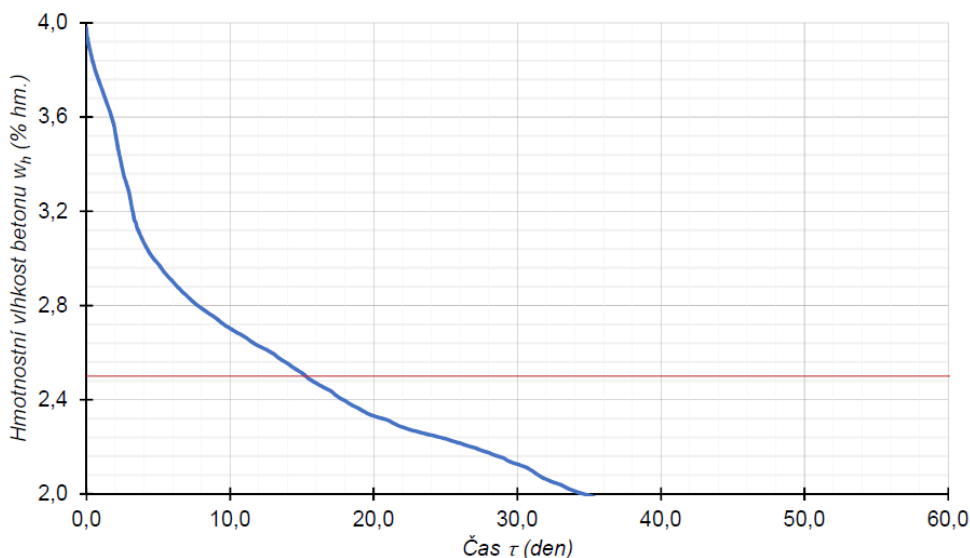
Ve čtvrté variantě byla zvýšena hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W), i násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ).

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.4.2-7. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňují Graf 4.4.2-8. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm$ .

Varianta 4 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
0,5	3,0



Graf 4.4.2-7: Varianta 4 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



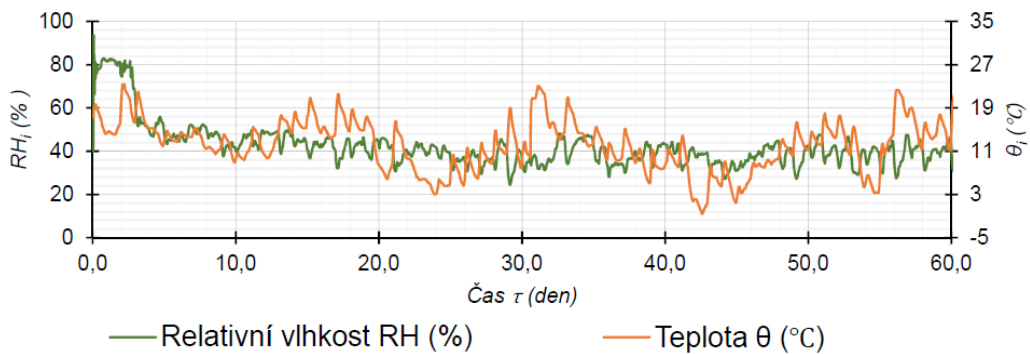
Graf 4.4.2-8: Varianta 4 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

### e) Varianta 5 velmi větraná a vytápěná budova

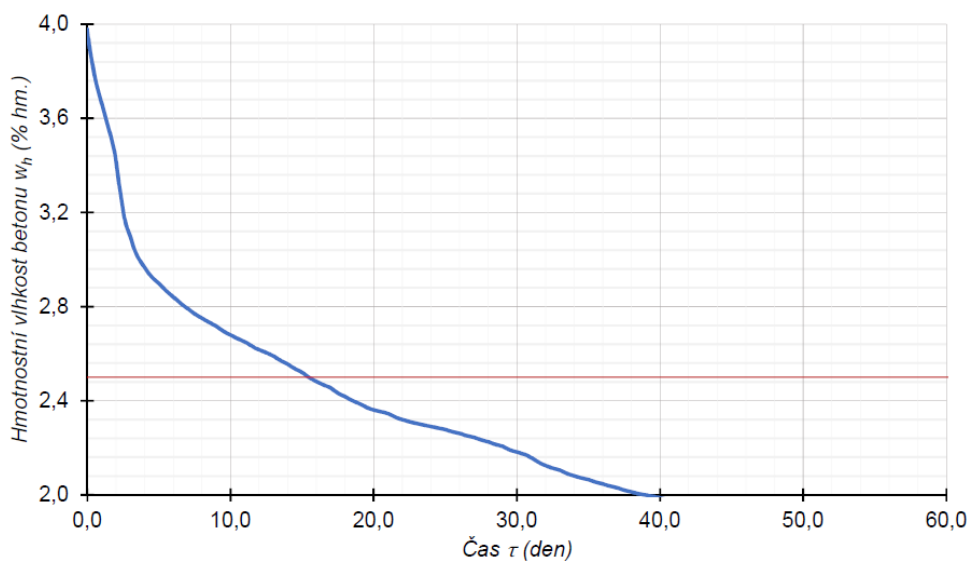
V páté variantě byla ještě navýšena hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ). Hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ) byla ponechána na stejné hodnotě.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.4.2-9. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňují Graf 4.4.2-10. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 5 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
1,0	3,0



Graf 4.4.2-9: Varianta 5 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



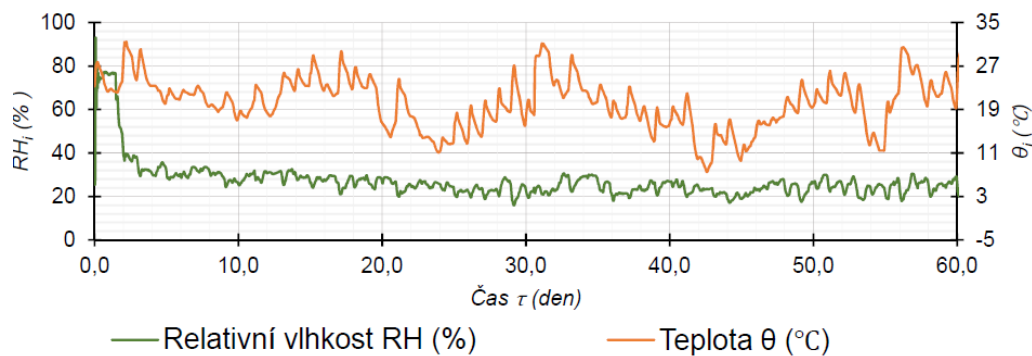
Graf 4.4.2-10: Varianta 5 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

### f) Varianta 6 velmi větraná a velmi vytápěná budova

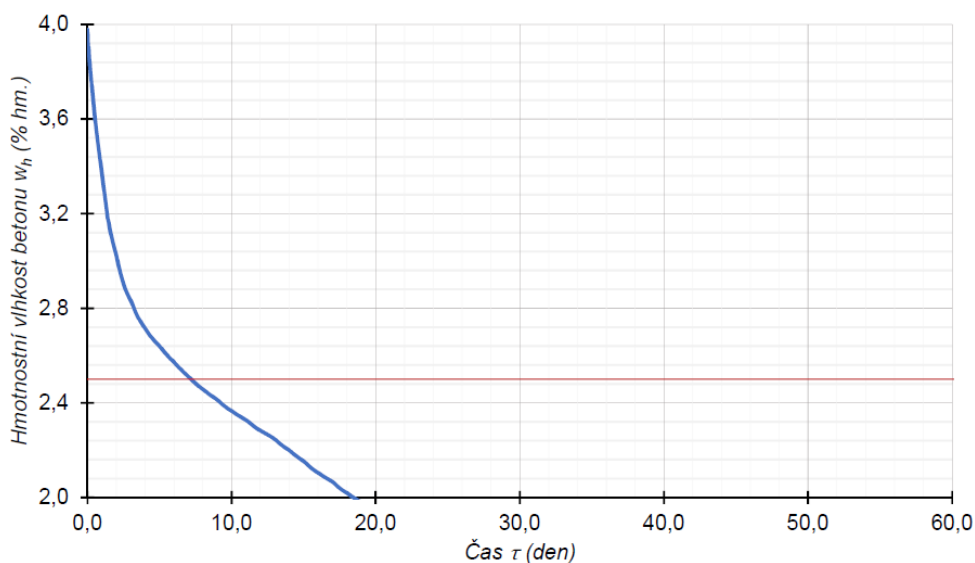
V šesté variantě byla ponechána hodnota násobnosti větrání  $n$  ( $h^{-1}$ ) na vysoké hodnotě a hodnota výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  ( $W$ ) byla navýšena.

Výslednou relativní vlhkost a teplotu vnitřního vzduchu shrnuje Graf 4.4.2-11. Výsledné hodnoty hmotnostní vlhkosti betonové podlahy znázorňují Graf 4.4.2-12. Červená linka ukazuje požadovanou hodnotu hmotnostní vlhkosti betonu  $w_h = 2,5 \% hm.$

Varianta 6 - vstupní parametry	
Násobnost větrání $n$ ( $h^{-1}$ )	Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)
1,0	5,0



Graf 4.4.2-11: Varianta 6 - průběh relativní vlhkosti a teploty vnitřního vzduchu



Graf 4.4.2-12: Varianta 6 - průběh hmotnostní vlhkosti betonové podlahy

#### 4.4.3 Vyhodnocení případové studie vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby

Vypočtené hodnoty z kapitoly 4.4.2 Vypočtené hodnoty shrnuje Tabulka 4.4.3-1. Byl stanoven čas simulace  $\tau_{w,fin}$  (den), ve kterém hodnota hmotnostní vlhkosti betonové podlahy  $w_h$  (% hm.) klesla pod požadovanou hodnotu 2,5 %. Z tabulky jsou patrné také zvolené hodnoty násobnosti výměny vzduchu  $n$  ( $h^{-1}$ ) a výkonu vnitřního zdroje tepla  $\Phi_i$  (W) v jednotlivých variantách. Pro názornost byla hodnota výkonu tepla přepočtena na cenu za vytápění v prvních 60 dnech simulace s uvažovanou sazbou 1,35 Kč/kWh. Dále byla vypočtena průměrná teplota vnitřního vzduchu  $\theta_i$  (°C) v prvních 60 dnech simulace. V těchto dnech byl navíc sledován počet hodinových kroků simulace, kdy relativní vlhkost vnitřního vzduchu dosáhla 100 %.



Varianta	1	2	3	4	5	6
Násobnostvětrání $n$ ( $h^{-1}$ )	0,0	0,5	0,0	0,5	1,0	1,0
Výkon zdroje tepla $\Phi_i$ (kW)	0,0	0,0	3,0	3,0	3,0	5,0
Odhad nákladů vytápění (Kč)	0	0	5830	5830	5830	9720
Průměrná vnitř. teplota $\theta_i$ ( $^{\circ}C$ )	0,0	0,0	18,7	14,7	12,1	20,2
Počet dosažení $RH_i = 100$ %	1016	147	1016	1	0	0
Požadavek hm. vlhkosti $w_h$ (% hm.)	2,5					
Čas vyschnutí betonu $\tau_{w,fin}$ (den)	198	115	126	15	15	7

Tabulka 4.4.3-1: Vyhodnocení vysychání betonových podlah v různých variantách

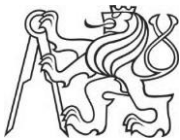
Je zřejmé, že varianta 1, kdy v simulaci nedocházelo ani k větrání budovy a vnitřní vzduchu nebyl nějak ohříván, vykazuje nejhorší výsledek. Vysychání vody z betonové podlahy je velmi pomalé. Dochází k velmi častému nasycení vnitřního vzduchu vodní parou vypařenou z betonové podlahy. V budově tak pravděpodobně dojde k rozsáhlé kondenzaci vodní páry na obvodových konstrukcích, což je pro dřevostavbu nežádoucí efekt. Může dojít k intenzivní sorpci vody do dřevěných konstrukcí a k následnému vzniku plísní a degradaci dřevěných materiálů.

Při zvýšení hodnoty větrání ve variantě 2 je sledováno zlepšení, beton však stále vysychá velmi pomalu a opět dochází k nasycení vnitřního vzduchu vodní parou, i když zdaleka ne v takové míře jako ve variantě 1.

Při vytápění budovy bez větrání ve variantě 3 dochází opět k výraznému zhoršení výsledků. Až varianta 4, která kombinuje větrání i vytápění budovy, vykazuje příznivé výsledky, kdy k nasycení vnitřního vzduchu vodní parou téměř nedochází a vlhkost betonu klesne na požadovanou hodnotu již po 15 dnech.

Varianta 5 ukazuje, že navýšení hodnoty větrání bez navýšení výkonu vytápění nemá na dobu vysychání téměř vliv. Naopak pokud spolu s násobností větrání navýšíme i výkon vytápění, může dojít k výraznému zlepšení, jak ukazuje varianta 6.

Z provedené simulace šesti variant vysychání betonové podlahy do dřevostavby lze učinit závěr, že pro urychlení vysychání betonové podlahy v zimních měsících je nejúčinnější kombinace větrání i vytápění budovy. Zvýšené větrání nad hodnotu  $n = 0,5 h^{-1}$ , bez navýšení výkonu vytápění téměř nemá efekt. Pro dosažení lepších výsledků je potřeba navýšení větrání i výkonu vytápění budovy.



## 5 Závěr

V práci byl nejprve sledován průběh vysychání vody z betonové podlahy na reálné dřevostavbě. Analýzou naměřených hodnot bylo zjištěno, že při nedostatečném větrání a vytápění vnitřního vzduchu se voda odpařená z betonu může ukládat do dřevěných konstrukcí a tím způsobit jejich degradaci. V práci tedy bylo dále zkoumáno, jakým způsobem lze ukládání vody do dřevěných konstrukcí zabránit a jak je možné urychlit proces vysychání.

Byl vytvořen matematický model, jež simuluje vysychání vody z betonové podlahy. Pro ověření relevantnosti matematického modelu byl proveden experiment vysychání betonových vzorků a byly měřeny fyzikální vlastnosti těchto vzorků. Hodnoty naměřené v experimentu byly porovnány s výsledky simulace v matematickém modelu. Na základě tohoto srovnání byl matematický model kalibrován.

S využitím matematického modelu byla provedena případová studie vysychání vody z betonové podlahy do dřevostavby, ve které byl zkoumán vliv vytápění a větrání budovy na proces vysychání.

### 5.1 Shrnutí relevantnosti matematického modelu

Porovnáním výstupů z matematického modelu se softwarem Wufi bylo zjištěno, že matematický model úspěšně simuluje vysychání jednovrstvé podlahy. Při simulaci dvouvrstvé podlahy se ukázalo, že matematický model nezapočítává fázový posun hmotnostní křivky způsobený akumulací vody v druhé vrstvě podlahy. Pro potřebu této práce jsou však výsledky matematického modelu dostatečné, protože v případové studii byla využita jen simulace jednovrstvé podlahy.

Porovnáním výstupů z matematického modelu s naměřenými hodnotami experimentu vysychání byly zjištěny značné odchylky. Došlo proto k úpravě faktoru difuzního odporu a doplnění matematického modelu o výpočet odparu vody z povrchu betonu. Po této kalibraci matematický model úspěšně simuloval vysychání vody z čerstvě vybetonovaných vzorků.

### 5.2 Shrnutí výsledků případové studie

Případová studie ukázala, jaká kombinace větrání a vytápění budovy má příznivý vliv na vysychání betonové podlahy. Pro urychlení vysychání v letních měsících je účinné



navýšit hodnoty větrání. Alespoň v prvních dnech je však nutné navýšit větrání nad hodnotu  $n = 0,5 h^{-1}$ , jinak dochází k nežádoucí kondenzaci vody na okolních konstrukcích. Jako nejúčinnější se ukázala kombinace intenzivního větrání a vytápění budovy, kdy došlo k požadovanému vyschnutí betonové desky za 6 dní od betonáže.

Pro urychlení vysychání betonové podlahy v zimních měsících je nejúčinnější kombinace větrání i vytápění budovy. Zvýšené větrání nad hodnotu  $n = 0,5 h^{-1}$ , bez současného navýšení výkonu vytápění nemá téměř žádný efekt. Pro dosažení lepších výsledků je potřeba navýšit větrání i výkon vytápění budovy, což vede k vyschnutí betonové podlahy za 7 dní od betonáže.

### 5.3 Splnění stanovených cílů práce

Úprava větrání a vytápění má na proces vysychání betonu výrazný vliv. Správnou kombinací větrání a vytápění budovy **lze zcela zamezit kondenzaci vodní páry** na okolních konstrukcích.

Proces **vysychání betonu je možné výrazně urychlit** intenzivním větráním a vytápěním budovy. Čímž lze zkrátit technologickou přestávku pro schnutí betonu a tím urychlit celou výstavbu.





## Seznam použité literatury

- [1] KÜNZEL, H.M., A. HOLM a A. KAUFMANN. Raumluftbedingungen für die Feuchteschutzbeurteilung. *IBP-Mitteilung*. 2003, **30**(427), 2.
- [2] Wufi. *Wufi pro* [online]. Petr Slanina [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://www.wufi.cz/wufi\\_pro/](http://www.wufi.cz/wufi_pro/)
- [3] Delphin. *Bauklimatik-Dresden* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php?aLa=en>
- [4] Description. *Match-Box* [online]. Ballerup: WordPress, 2016 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://match-box.dk/description/>
- [5] POPENKOVÁ, Miloslava. Podlahy. Praha. Vysokoškolská přednáška. Dostupné také z: [technologie.fsv.cvut.cz/download.php?id=6433](http://technologie.fsv.cvut.cz/download.php?id=6433)
- [6] KOPECKÝ, Pavel. Stavební tepelná technika: Šíření tepla, vzduchu a vlhkosti v budovách a stavebních prvcích. Praha, 2014. ČVUT v Praze Fakulta stavební.
- [7] SVOBODA, Luboš, Zdenka BAŽANTOVÁ, Milan MYŠKA, Jaroslav NOVÁK, Zdeněk TOBOLKA, Roman VÁVRA, Alena VIMMROVÁ a Jaroslav VÝBORNÝ. *Stavební hmoty*. 2. Bratislava: Jaga group, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [8] ČSN 74 4505. *Podlahy – Společná ustanovení*. ÚNMZ, 2012.
- [9] ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. ÚNMZ, 2011
- [10] ČSN EN ISO 12570. Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě. ÚNMZ, 2001.
- [11] ČSN EN 13813. Potěrové materiály a podlahové potěry - Potěrové materiály - Vlastnosti a požadavky. ÚNMZ, 2003.
- [12] ČSN EN 206+A1. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ÚNMZ, 2018.
- [13] SCHEFFLER, Gregor a Rudolf PLAGGE. Defined drying behaviour measurement for building materials.



- [14] SCHEFFER, Gregor Albrecht. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. Dresden, 1978. Achievement of the academic degree Doctor of Engineering. Dresden University of Technology.
- [15] Postup při přípravě a ukládání betonové směsi. StavebníVzdělání.cz [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.stavebni-vzdelani.cz/betonovani/>
- [16] TŮMA, Petr. Podlahové potěry. TZB-INFO [online]. Topinfo, 2016 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/podlahy/14726-podlahove-potery>
- [17] ŠMÍD, Daniel. E-mailová komunikace. 2017-11-09.