

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Diplomová práce

Fasádní desky z textilního betonu

Vypracoval: Vojtěch Šiman

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.

Praha 2016



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šiman Jméno: Vojtěch Osobní číslo: 395988
Zadávací katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb K124
Studijní program: Budovy a prostředí
Studijní obor: Konstrukce staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Fasádní desky z textilního betonu
Název diplomové práce anglicky: Facade panels made of textile reinforced concrete

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce bude obsahovat tyto dílčí kroky:

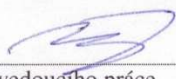
1) Průzkum literatury. Jedná se například o vyhledání publikovaných hodnot materiálových vlastností, anebo o přehled různých metod použití tenkých desek z textilního betonu v obálce budovy. 2) Laboratorní měření. Jedná se o měření faktoru difuzního odporu, nasákavosti a součinitele tepelné vodivosti. Budou se srovnávat dva materiály: vysokohodnotný beton a standardní (referenční) beton. 3) Tepelně-technické posouzení. Jedná se o návrh různých variant využití desek z textilního betonu v obálce budovy. Výpočtové posouzení variant s využitím standardních inženýrských, případně simulačních modelů.

Seznam doporučené literatury:

-

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

Datum zadání diplomové práce: 4.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
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“.

13. 10. 2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Fasádní desky z textilního betonu jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce.

V Praze 17. října 2016

Vojtěch Šiman

.....

Poděkování

Velké poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Kopeckému, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, rady a připomínky, které mě motivovaly v průběhu vytváření této diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Tomáši Vlachovi a Ing. Lence Laiblové za jejich pomoc při betonáži vzorků a podporu i motivaci při mé práci.

Poděkovat bych chtěl taky Univerzitnímu centru energeticky efektivních budov (UCEEB) za poskytnutí prostor a prostředků k realizaci výzkumu textilních panelů.

V neposlední řadě děkuji také své rodině a přátelům za velkou podporu, která také přispěla k vypracování této práce.

Anotace

Diplomová práce Fasádní desky z textilního betonu popisuje možné využití desek z vysokohodnotného betonu vyztužených textilní vyztuží. Práce je rozdělena na část laboratorní a na část výpočetní.

Laboratorní část zahrnuje popis betonáže a laboratorní měření fyzikálních vlastností vybetonovaných vzorků. Jedná se o součinitel tepelné vodivosti λ , faktor difuzního odporu μ a kapilární vztlínatost materiálu.

Část výpočetní obsahuje návrh skladeb konstrukcí a posouzení jejich chování v konstrukci během celého roku. Dále jsou zde jednoduché příklady na objasnění rozdílu mezi standardním betonem a textilním betonem. Posouzení je provedeno ve dvou programech, Teplo 2010 a Wufi Pro 6.

Klíčová slova: Textilní beton (TRC), vysokohodnotný beton (HPC), tenké fasádní desky, součinitel tepelné vodivosti, faktor difuzního toku, kapilární vztlínatost materiálu.

Annotation

Diploma thesis Facade slabs from textile reinforced concrete describes the possible use of high performance concrete slabs reinforced with textile reinforcement. The work is divided into laboratory part and computational part.

The laboratory part includes a description of concreting and laboratory measurements of physical properties of concrete samples. It is a coefficient of thermal conductivity λ , a diffusion resistance factor μ and the capillary attraction of the material.

Computational part contains a proposal of the composition of structures and assess their behavior in the structure during the year. There are single experiments with only one material to explicate the difference between standard concrete and textile reinforced concrete. The proposal is designed in two computational programs, Teplo 2010 and Wufi Pro 6.0.

Key words: Textile reinforced concrete (TRC), High performance concrete (HPC), thin facade, coefficient of thermal conductivity, flow factor diffusion, capillary attraction of the material.

Obsah

1. Úvod	7
1.1. Současný stav problematiky	7
1.2. Cíle práce	11
2. Laboratorní zkoumání	12
2.1. Betonování vzorků	12
2.2. Objemová hmotnost	17
2.3. Součinitel tepelné vodivosti	21
2.4. Faktor difuzního odporu	23
2.5. Kapilární vztlínavost	31
3. Výpočtová část	35
3.1. Parametry materiálů	35
3.1.1. Objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti	35
3.1.2. Sorpční izoterma	35
3.1.3. DWW a DWS	37
3.2. Návrh v programu Teplo 2010	38
3.3. Návrh v programu WUFI Pro 6.0	42
3.3.1. Styk s vodou	42
3.3.2. Skoková změna relativní vlhkosti	44
3.3.3. Vysychání	46
3.3.4. Větre m hnaný déšť	48
3.3.5. Reálné konstrukce v reálných podmínkách	52
3.4. Porovnání Wufi a Tepla	54
4. Závěr	56
Bibliografie	58
Seznam Obrázků	59
Seznam tabulek	60
Elektronické přílohy	61

1. Úvod

Beton neboli „umělý kámen“ je nenahraditelný stavební materiál současné doby. Skládá se z plniva (kamenivo a písek), pojiva (cement), vody, příměsí a přísad. Technologický pokrok nám umožňuje vyvíjet nové, lepší směsi na vytvoření tzv. vysokohodnotného betonu. Vysokohodnotné betony slouží k vylepšení vlastností a kvality betonových konstrukcí za využití méně materiálu než u standardního betonu. Další výhodou je také variabilita návrhu betonových prvků. Textilní beton (TRC) je kompozit sestávající z betonové směsi vyztužené plošnou anorganickou textilí (1).

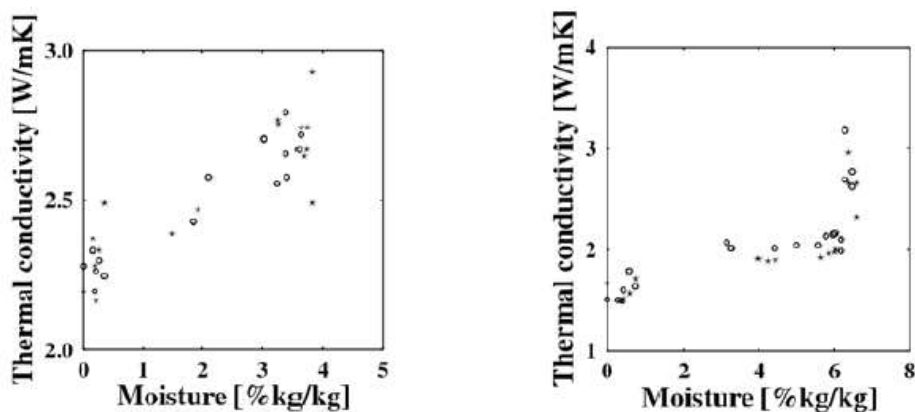
Diplomová práce pojednává o fasádních deskách z textilního betonu. Jedná se o fasádní panel tloušťky 24 mm z vysokohodnotného betonu s textilní výztuží (TRC), který používá materiálovou kombinaci vysokohodnotného betonu (HPC) a výztuže z technických textilií. Tato kombinace umožňuje udělat velmi tenké konstrukce, které by se daly využít například jako ochranná vrstva izolace, jako vrstva v kontaktu s vnějšími podmínkami.

Motivací pro výběr tohoto tématu mi byla atraktivita práce na výzkumu nových materiálů, práce v laboratoři a v neposlední řadě modelování chování prvků v konstrukcích.

1.1. Současný stav problematiky

Vysokohodnotný beton (HPC) se využívá hlavně díky jeho vysoké pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Díky němu vznikají konstrukce, které jsou tenké a mají velkou pevnost. Menší potřebou materiálů redukuje spotřebu neobnovitelných materiálů a snižujeme vliv na životní prostředí. U těchto materiálů je velký pokrok ve vlastnostech, hlavně z hlediska odolnosti na zatížení, trvanlivosti a mechanické odolnosti. První výzkumy HPC jsou z počátku 70. let minulého století. Přidáním nových typů plastifikátorů se snížil vodní součinitel pod hodnotu 0,35 a beton se stal pevnějším. Oproti standardnímu betonu má sice HPC větší pevnost v tahu, ale po přenesení tahových sil musí být přidána dodatečná výztuž. V běžném betonu je používána ocelová výztuž, která má však potřebu minimální krycí vrstvy proti korozi. Přidáním textilní výztuže místo ocelové vznikne textilní beton (TRC). To vede k další redukci výsledné tloušťky konstrukce, protože textilní výztuž nepotřebuje krycí vrstvu, jako v případě ocelové výztuže (2).

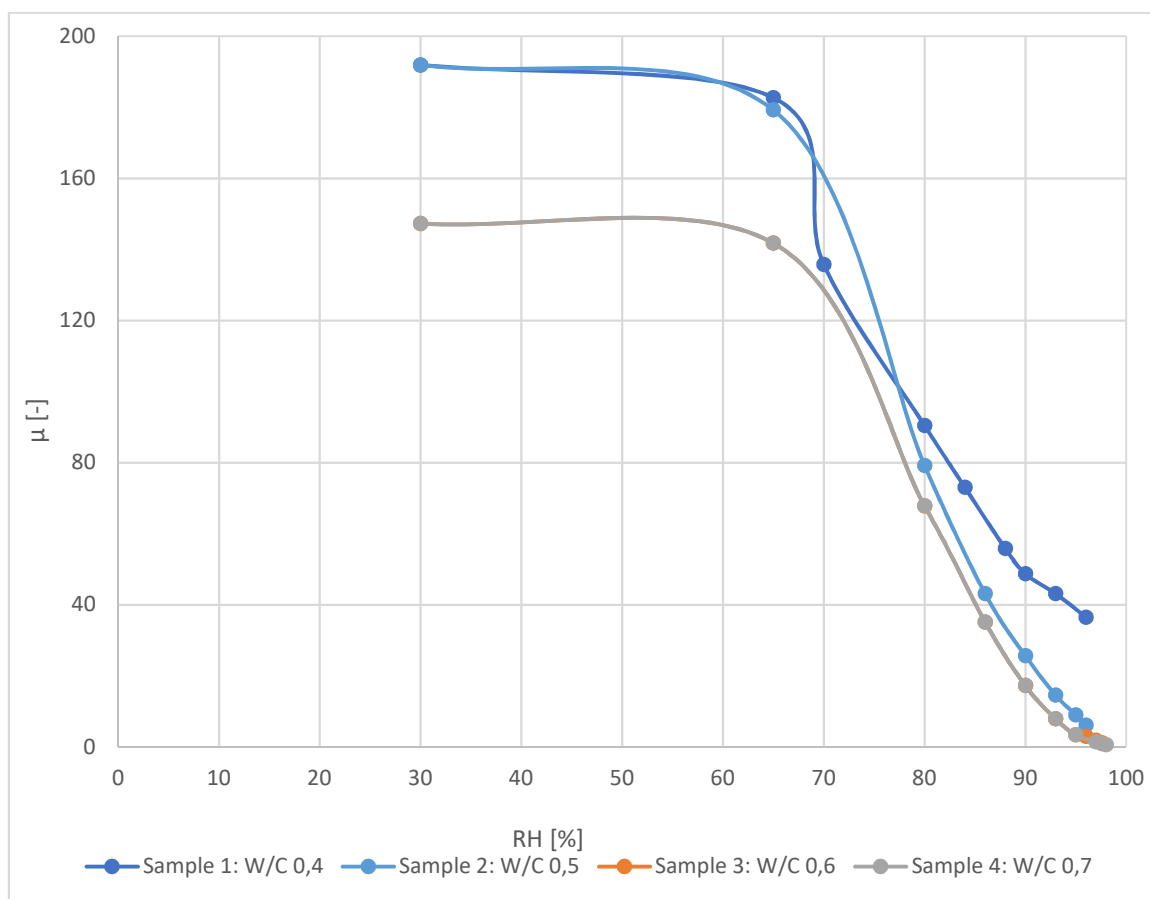
Tepelné vlastnosti vysokohodnotného betonu se liší nejen v závislosti na složení směsi, ale i na pórovitosti a obsahu vlhkosti. Údaje o tepelných vlastnostech vysokohodnotných betonů jsou však poněkud omezeny. Parametry, jako jsou tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, difuzivita nebo součinitel tepelné roztažnosti, mají u vysokohodnotných betonů přibližně stejné rozsahy jako u betonů obyčejných. Balaysac a kol. v roce 1993 pomocí zkoušky nasákavosti posoudil pórovitost vrchního betonu a velikost jeho největších pórů, který určují trvanlivost betonu. Z výsledku vyplynulo, že zkouška může být použita k zjištění efektu obsahu cementu na pórovitost betonu a k vysvětlení příznivých účinků zrání betonu na velikost kapilár (3).



Obrázek 1: Tepelná vodivost v závislosti na vlhkosti pro HPC z Penly a pro HPC z Temelína (různé druhy značek odpovídají různým vzorkům)

J. Toman a R. Černý ve své článku Thermal Conductivity of High Performance Concrete in Wide Temperature and Moisture Ranges publikují výzkum tepelné vodivosti v závislosti na teplotě a na obsahu vlhkosti na dvou směsích vysokohodnotných betonů používaných v jaderných elektrárnách. Jedním je elektrárna ve francouzském Penly a druhým je český Temelín. Výsledky při různých teplotách nejsou pro tuto práci zajímavé, protože byli zkoušeni za teplot od 100 °C do 800 °C, nicméně obě směsi vykazovali velmi podobné chování. Z této zkoušky plyne, že teplota má na tepelnou vodivost významný vliv. Při druhé zkoušce, byla tepelná vodivost měřena na vzorcích suchých a vlhkých až do plného nasycení. Výsledky ukazují významné změny tepelné vodivosti v závislosti na obsahu vlhkosti a jsou stejně zásadní jako změny v závislosti na teplotě. Jak teplota tak i vlhkost jsou důležité parametry materiálu, které mohou mít za následek značné kolísání tepelné vodivosti (4).

Faktor difuzního odporu je bezrozměrná veličina, která vyjadřuje, kolikrát lépe propouští vodní páru nehybná vrstva vzduchu než stejná tloušťka daného materiálu (5). Z rozboru literatury plyne, že faktor difuzního odporu je závislý na složení směsi, na vodním součiniteli a především na relativní vlhkosti. Následujícím grafu ukazuje závislost faktoru difuzního odporu na relativní vlhkosti podle katalogu IEA Annex 24 Task 3, pod grafem jsou rozepsány směsi betonů.



Obrázek 2: Graf - faktor difuzního odporu podle katalogu IEA (6)

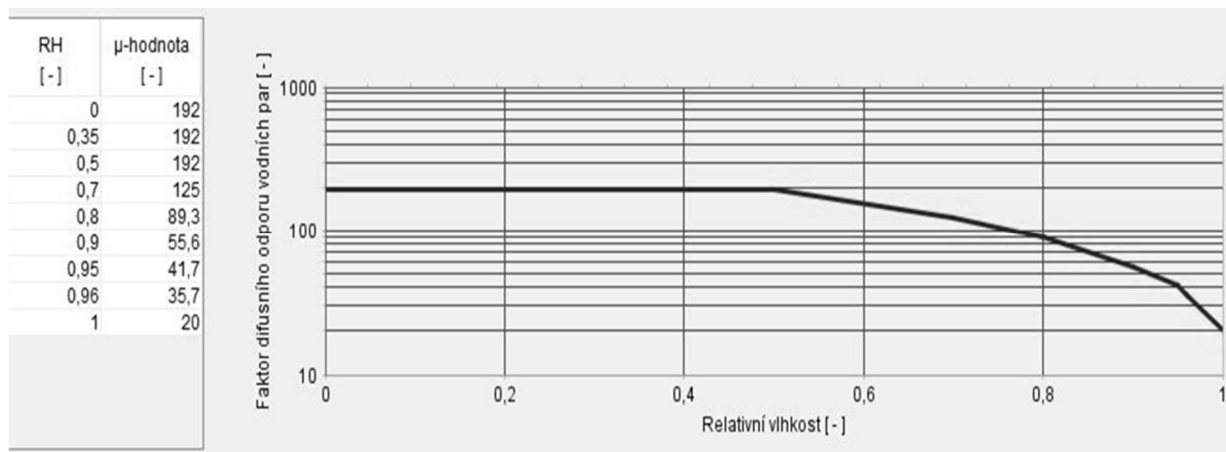
Sample 1. Composition: Cement = 418 kg·m⁻³; Water = 167 kg·m⁻³; Sand = 990 kg·m⁻³; Macadam = 910 kg·m⁻³.

Sample 2. Composition: Cement = 368 kg·m⁻³; Water = 184 kg·m⁻³; Sand = 990 kg·m⁻³; Macadam = 910 kg·m⁻³.

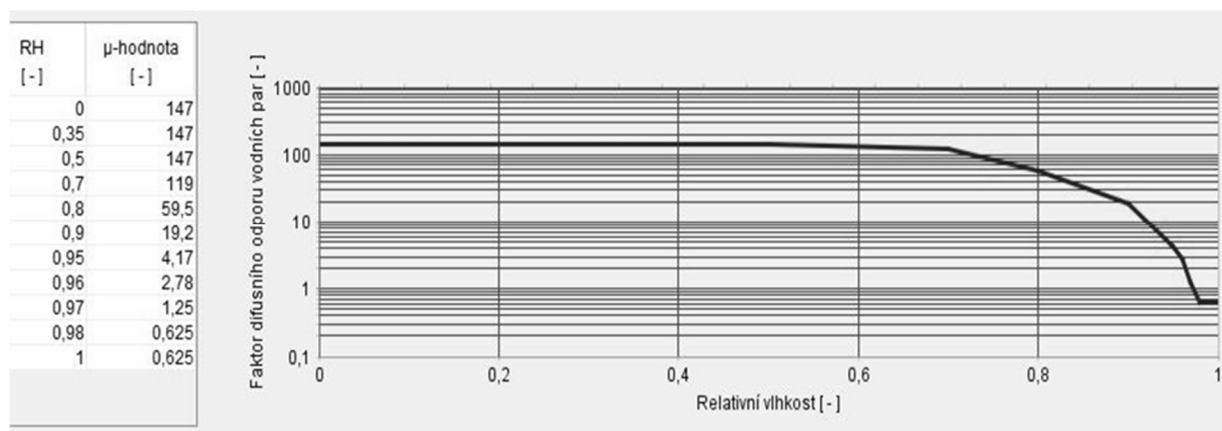
Sample 3. Composition: Cement = 328 kg·m⁻³; Water = 197 kg·m⁻³; Sand = 990 kg·m⁻³; Macadam = 910 kg·m⁻³.

Sample 4. Composition: Cement = 296 kg·m⁻³; Water = 207 kg·m⁻³; Sand = 990 kg·m⁻³; Macadam = 910 kg·m⁻³.

Z grafu je vidět, že faktor difuzního odporu se za různých podmínek a u různých směsí podstatně liší. Následující obrázky jsou z programu WUFI, který slouží k modelování tepelně-vlhkostního chování konstrukcí.



Obrázek 3: Difuzní odpor, beton W/C=0,4

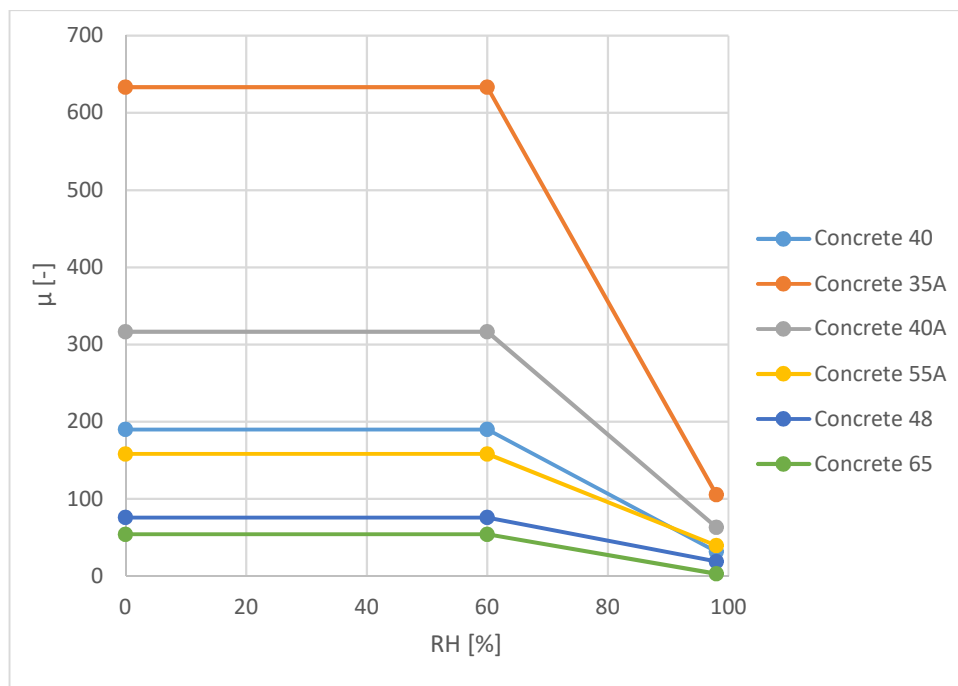


Obrázek 4: Difuzní odpor, beton W/C=0,7

Tyto grafy ukazují, že do určité hodnoty relativní vlhkosti je funkce faktoru difuzního odporu konstantní. Po překročení této hodnoty začíná faktor rapidně klesat.

V publikaci od Doc. Ing. Františka Mrlíka, DrSc. Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí z roku 1985 je uvedeno, že železobeton s objemovou hmotností 2400 kg/m³ má faktor difuzního odporu 26 a betonové prefabrikáty, podle zahraničních údajů mají tuto hodnotu 100. Tyto hodnoty byly zjištěny za teploty +10°C, bohužel není zde psáno za jaký relativní vlhkosti (7).

Program Match, který slouží také k modelování transportu tepla a vlhkosti konstrukcemi, ve své databázi uvádí několik typů betonů. U těchto betonů uvádí hodnoty při třech různých relativních vlhkostech (0 %, 60 % a 98 %), přičemž při 60 % a 0 % vlhkosti udává stejné hodnoty a při 98 % hodnotu značně nižší. Tyto hodnoty jsou ukázány v následujícím grafu. Číslo u označení betonu určuje vodní součinitel směsi (např. Concrete 48: w/c=0,48).



Obrázek 5: Graf z hodnot programu Match

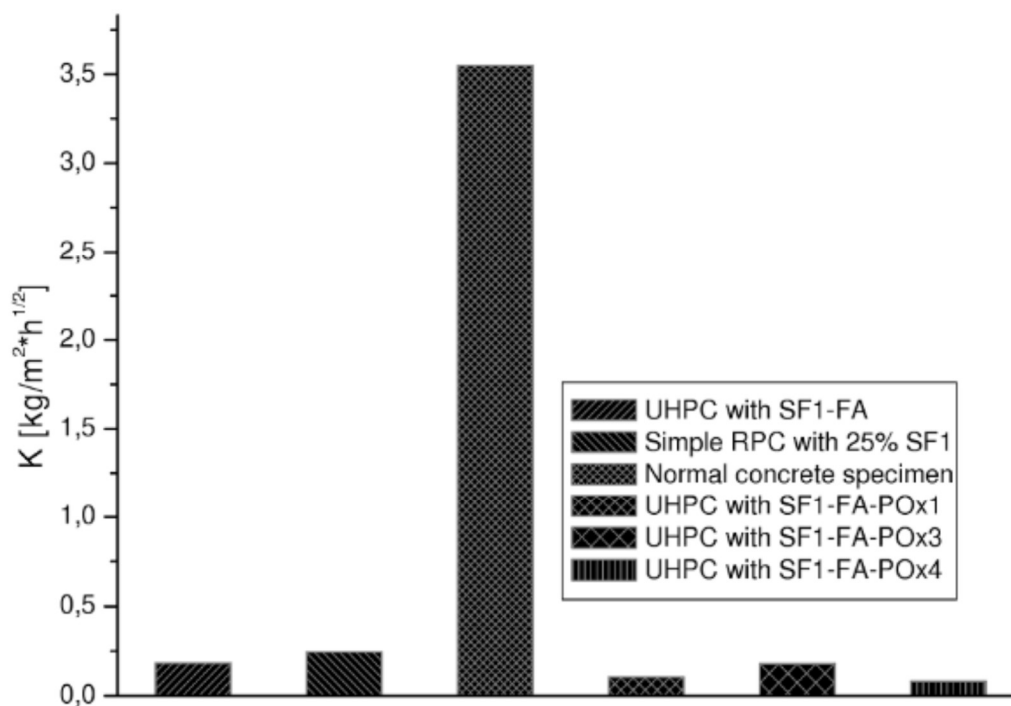
Jak je vidět, čím má beton větší vodní součinitel (w/c), tím je víc propustný pro vodní páry. Dále je jasné, že čím větší je střední relativní vlhkost prostředí, tím má vodní pára snazší cestu skrz konstrukci.

Schopnost materiálu přijímat kapalnou vodu se nazývá nasákavost. Je to poměr přijatého hmotnostního množství vody ku hmotnosti vysušeného vzorku vyjádřený v procentech hmotnosti nebo objem přijaté vody v procentech objemu. Z velikosti nasákavosti můžeme předvídat riziko vzniku koroze výztuže a mrazuvzdornost betonu. V tabulce jsou hodnoty vyzkoumané panem Mrlíkem z publikace *Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí* (7) (8).

Materiál	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%] za				
		15 min	30 min	120 min	1 den	7 dní
Prostý beton	2169	4,05	5,12	6,6	7,03	7,45
Beton s JMC	2192	1,17	1,48	2,52	4,53	4,93
Beton s plas. Př.	2137	0,63	0,9	2,33	5,57	15,27

Tabulka 1: Hodnoty z publikace *Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí* z roku 1985

Beton s plastifikační přísadou má ze začátku daleko menší nasákavost než prostý beton. Po sedmi dnech však má prostý beton nasákavost daleko menší. Tohle chování je však z doby, kdy ještě HPC nebylo tolik vyzkoumané jako dnes. Aktuálnější informace můžeme nalézt v publikaci *Ultra High Performance Concrete*, kde porovnávají součinitel absorpce vody u několika vzorků UHPC (každý vzorek s jiným pyrogenním oxidem, který se používají k získání ultra pevnosti nebo jinému zlepšení vysokohodnotného betonu) a jednoho vzorku normálního betonu. Na grafu je vidět, že normální beton má tento součinitel mnohem větší. Přisuzují to pórovitosti materiálu a taky velikosti pórů. Rozdíly mezi UHPC vzorky však nejsou dány jenom rozdílem v pórovitosti, ale také pravděpodobně dalšími charakteristikami výsledné mikrostruktury a nanostruktury (9).



Obrázek 6: Součinitel absorpce vody (28 dní staré vzorky)

Doposud byl textilní beton využíván nejvíce pro zesilování stávajících konstrukcí a pro skořepinové konstrukce různých tvarů. Využití textilního betonu však v současné době velmi roste. Používá se v mostech, pilířích a dalších, aby odolaly vibracím, trhlinám a kroucení. Dále se také používá v designových výrobcích, kde využívá výhodu, že se dají vyrobit velmi subtilní konstrukce (např. česká firma Betone). Firma TAKTL z USA vyrábí fasádní panely z UHPC, ale jsou vyztuženy speciálními vlákny, ne textilní výztuží. Fasádní panely z vysokohodnotného betonu s textilní výztuží jsou stále ve výzkumu a třeba se jednou stanou běžnou součástí stavebnictví.

1.2. Cíle práce

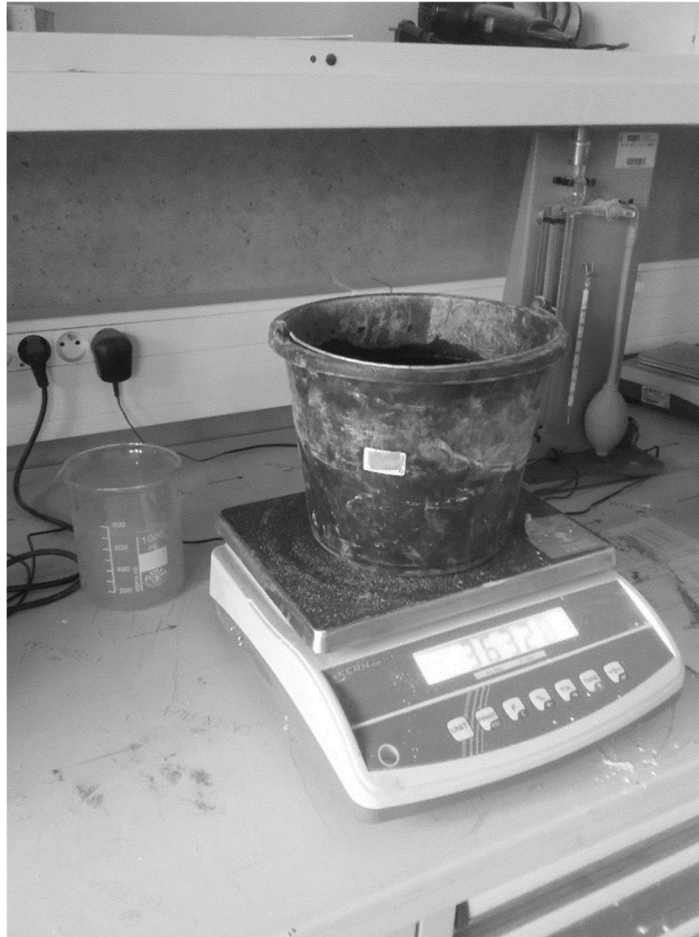
Cílem laboratorní části je správná betonáž vzorků. Pro měření materiálových vlastností potřebujeme vzorky z betonu referenčního, betonu vysokohodnotného bez textilní výztuže a betonu vysokohodnotného s textilní výztuží. Dalším cílem je charakterizace vzorků pomocí standardních laboratorních měření tepelně technických parametrů. Na zkušebních vzorcích potřebujeme změřit součinitel tepelné vodivosti, faktor difuzního odporu a součinitel kapilární vztlakovosti.

Cílem výpočetní části je teoretické ověření možných aplikací na budovách (modelování tepelně vlhkostního chování souvrství). Nejdříve zde budou jednoduché příklady se samotnými materiály, pro objasnění rozdílů mezi standardním betonem a TRC. Tyto příklady budou zaměřeny na styk materiálu s vlhkostí a její transport konstrukcí. V další části bude modelování skutečných konstrukcí za skutečných podmínek a zkoumání jejich chování v průběhu roku. Pro tuto část bude použit program Teplo 2010 a Wufi Pro 6.0.

2. Laboratorní zkoumání

2.1. Betonování vzorků

První týden jsme s pomocí Tomáše Vlacha, Lenky Laiblové a Jakuba Řepky betonovali vzorky z HPC bez textilní výztuže. Na zkoušku tepelné vodivosti potřebujeme tři vzorky 300 x 300 x 60 mm (označení HPC; C). Bednění na tyto vzorky bylo již připraveno (smontováno z dřevěných desek), tak jsme se mohli hned pustit do práce. Bednění jsme vyčistili a namazali olejem. U HPC je důležité namíchat jednotlivé složky v přesném poměru a pořadí. Nejprve však byli všechny složky naváženy na přesné digitální váze.



Obrázek 7: Vážení surovin HPC

První várku jsme míchali v malé míchačce na cca 5 litrů, toto množství vystačilo sotva na jeden vzorek, práce byla tedy celkem zdlouhavá. Složení betonu viz tabulka: (pro 1 m³ HPC)

Component	m [kg]	ρ_v [kg/m ³]
Cement CEM I 42,5R	680	3100
Technical quartz sand	960	2600
Microsilica	175	220
Technical quartz powder	325	1600
Superplasticizer based on PCE	29	1200
Water	171	1000
Sum	2340	

Tabulka 2: Suroviny HPC

V daném pořadí byly promíchány všechny suché komponenty. Závěrem byl přidán plastifikátor s vodou. Celková doba míchání suchých komponent byla 8 minut, po přidání vody jsme míchali také přibližně 8 minut. Čas se nastavil přímo na míchačce. Odebrali jsme nádobu s betonem a vybetonovali část prvního vzorku.



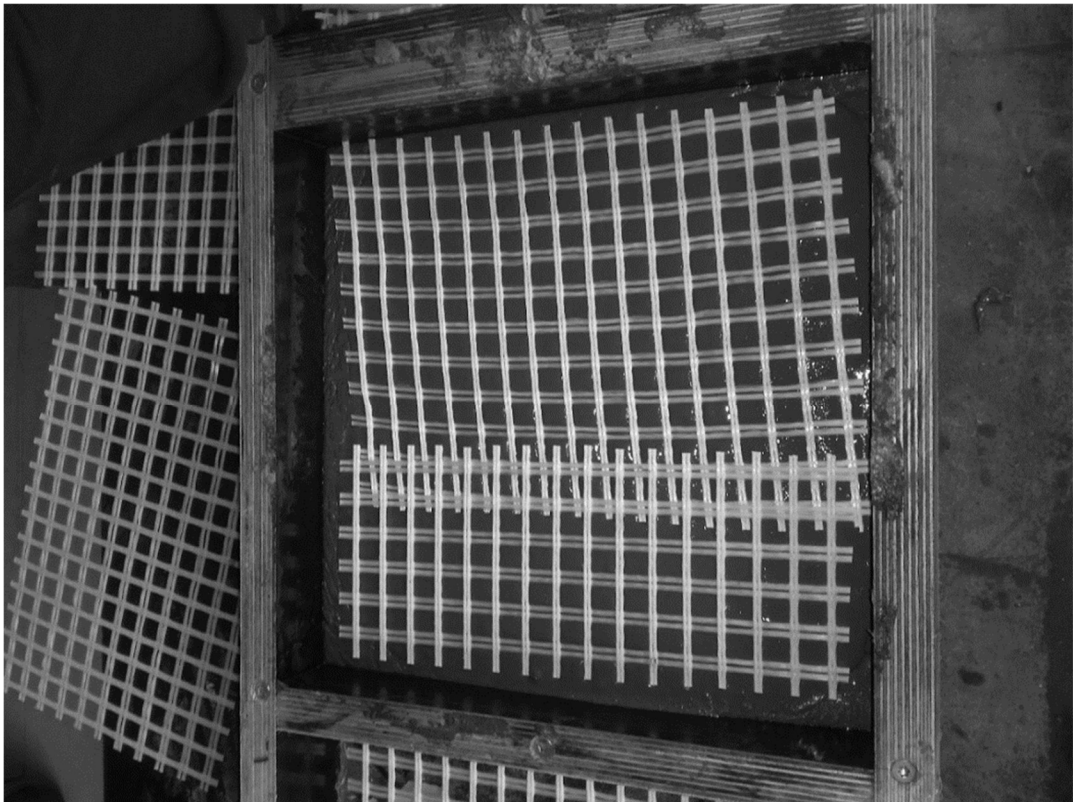
Obrázek 8: Betonáž HPC

Po čtyřech várkách jsme měli vybetonované všechny tři vzorky a k tomu ještě 6 trámek o rozměrech 40 x 40 x 160 mm na zkoušku kapilární vztlávanosti (označení KHPC; KC). Na tyto trámky jsme měli připravené přesné ocelové bednění.

Při další betonáži jsme se s Tomášem Vlachem a Pavlem Kopeckým pustili do betonáže vzorků z HPC s textilní výztuží. Jako výztuž byla použita 3D textilie ze speciálního skla odolného alkáliím (AR sklo), která má jednotlivé svazky vláken opatřeny maticí z epoxidové pryskyřice. Tentokrát jsme se rozhodli umíchat beton najednou ve velké míchačce. Složení betonu je furt stejné. Jen odpadá práce s neustálým vážením komponent a čistěním pomůcek. Betonáž byla o dost rychlejší než posledně. Textilní výztuž byla vložena pouze do vzorků na zkoušku tepelné vodivosti (označení TRC). Rozvrstvení výztuže je zhruba po 1 cm, tedy v pěti vrstvách. Současně jsme betonovali i kulaté vzorky na zkoušku difuzního odporu (označení DHPC; DC). Na tyto vzorky máme již zhotovené ocelové formy. Bohužel tyto formy jsou o něco málo větší, než potřebujeme. Museli jsme tedy formy zmenšit pomocí lepicí pásky. Vybetonovali jsme 4 vzorky z HPC bez výztuže.



Obrázek 9: Míchačka M 180



Obrázek 10: Betonáž TRC



Obrázek 11: Forma na vzorek pro zkoušku difuzního odporu

Poslední týden mě a Lenku Laiblovou čekala betonáž všech vzorků z běžného, referenčního betonu. Tedy zase 3 kvádry 300 x 300 x 60 mm, 6 trámky 40 x40 x 160 mm a 4 kulaté vzorky. Složení betonu je následující: množství je opět uvedeno na m³.

Component	m [kg]	ρ_v [kg/m ³]
Cement CEM II , 5R	350	3100
Písek 0-4	850	2685
Štěrka 4-8	300	2678
Štěrka 8-16	660	2664
Voda	170	1000
Celkem	2330	

Tabulka 3: Suroviny běžného betonu

V tabulce jsou suroviny na 1 m³ betonu. Ve skutečnosti jsme míchali pouze 20 litrů. Použili jsme klasickou stavební míchačku.



Obrázek 12: Stavební míchačka



Obrázek 13: Betonáž běžného betonu

Po každé betonáži bylo třeba vyčistit všechny nástroje a míchačky. Ne velkou laboratorní jsme museli povolat techniky, její čištění je totiž náročnější. Po odbednění jsme prvky popsali a uložili do vody do místnosti se stálou teplotou a vlhkostí, aby vzorky vyzráli.



Obrázek 14: Popis vzorků

Beton zraje 28 dní, tak jsme se mohli zhruba po měsíci od první betonáže pustit do měření.

2.2. Objemová hmotnost

K výpočtu objemové hmotnosti bylo zapotřebí vzorky zvážit a změřit všechny rozměry. Vážení vzorků proběhlo několikrát, prvně po vyndání z vodní lázně, potom po několika týdnech a po několika měsících. Na rozdílech hmotností je vidět, jak se beton zbavuje vody. Každý rozměr byl změřen třikrát pomocí digitálního a manuálního posuvného měřítka. Z těchto údajů byla vypočtena objemová hmotnost každého vzorku.

Vzorek	Hmotnost [g]		
	15.6.2016	23.6.2016	13.10.2016
HPC1	-	12202,7	12184,9
HPC2	12897,4	12889,4	12874,4
HPC3	12396,0	12388,0	12372,3
TRC1	12700,9	12694,4	12679,6
TRC2	12585,6	12578,5	12563,6
TRC3	13302,7	13296,0	13279,1
C1	-	11757,3	11514,5
C2	-	12157,0	11906,6
C3	-	12172,8	11917,8
KHPC1	593,7	592,7	590,8
KHPC2	585,0	584,3	582,5
KHPC3	572,0	571,5	569,7
KHPC4	582,0	581,3	579,5
KHPC5	576,5	575,8	574,2
KHPC6	594,4	593,5	591,8
KC1	-	581,6	564,5
KC2	-	590,7	574,5
KC3	-	577,7	560,9
KC4	-	588,1	571,6
KC5	-	585,8	569,2
KC6	-	583,3	567,2
DHPC1	643,9	642,9	-
DHPC2	582,7	581,8	-
DHPC3	583,9	582,9	-
DHPC4	598,5	597,7	-
DC1	629,4	615,6	-
DC2	620,9	607,3	-
DC3	622,3	608,0	-
DC4	636,4	621,9	-

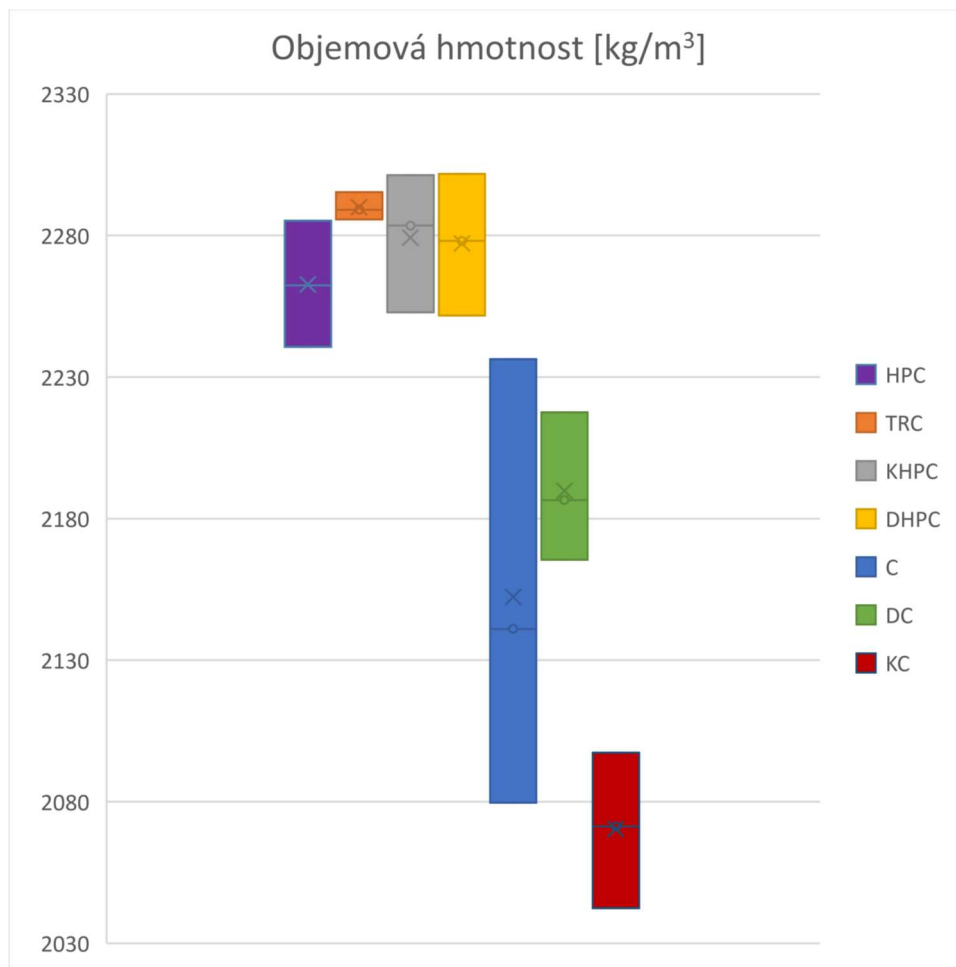
Tabulka 4: Hmotnosti vzorků

Z tabulky je vidět, jak se vzorky zbavují vody. U standardního betonu jsou rozdíly znatelné, to je nejspíš zapříčiněno velkým množstvím záměsové vody ($w=0,5$). HPC má velmi nízký vodní součinitel ($w=0,25$) a proto rozdíly hmotností nejsou tak velké. Také má velký faktor difuzního odporu a malý součinitel nasákavosti, proto se zbavuje vody pomaleji než standardní beton.

Vzorek	m [kg]	A [m]	B [m]	H [m]	V [m ³]	ρ_v [kg/m ³]	$\bar{\rho}_v$ [kg/m ³]
HPC1	12,1849	0,2997	0,3003	0,0604	0,00544	2241	2262
HPC2	12,8744	0,2992	0,3058	0,0616	0,00563	2285	
HPC3	12,3723	0,3005	0,2977	0,0611	0,00547	2261	
TRC1	12,6796	0,2978	0,3002	0,0618	0,00552	2295	2289
TRC2	12,5636	0,2995	0,3001	0,0611	0,00550	2286	
TRC3	13,2791	0,2992	0,3058	0,0635	0,00581	2286	
C1	11,5145	0,2984	0,3002	0,0610	0,00546	2107	2141
C2	11,9066	0,3001	0,2999	0,0592	0,00532	2236	
C3	11,9178	0,2997	0,3056	0,0626	0,00573	2080	
KHPC1	0,5908	0,1600	0,0402	0,0399	0,00026	2299	2284
KHPC2	0,5825	0,1598	0,0396	0,0399	0,00025	2301	
KHPC3	0,5697	0,1599	0,0394	0,0400	0,00025	2265	
KHPC4	0,5795	0,1598	0,0401	0,0402	0,00026	2253	
KHPC5	0,5742	0,1598	0,0394	0,0400	0,00025	2285	
KHPC6	0,5918	0,1599	0,0404	0,0399	0,00026	2299	
KC1	0,5645	0,1604	0,0422	0,0401	0,00027	2081	2071
KC2	0,5745	0,1603	0,0433	0,0401	0,00028	2067	
KC3	0,5609	0,1603	0,0422	0,0401	0,00027	2072	
KC4	0,5716	0,1604	0,0424	0,0401	0,00027	2097	
KC5	0,5692	0,1609	0,0427	0,0400	0,00028	2067	
KC6	0,5672	0,1606	0,0432	0,0401	0,00028	2042	
DHPC1	0,6429	0,1151	-	0,0270	0,00028	2289	2278
DHPC2	0,5818	0,1156	-	0,0244	0,00026	2270	
DHPC3	0,5829	0,1153	-	0,0248	0,00026	2252	
DHPC4	0,5977	0,1150	-	0,0250	0,00026	2302	
DC1	0,6156	0,1150	-	0,0270	0,00028	2195	2187
DC2	0,6073	0,1150	-	0,0270	0,00028	2165	
DC3	0,608	0,1150	-	0,0270	0,00028	2168	
DC4	0,6219	0,1150	-	0,0270	0,00028	2218	

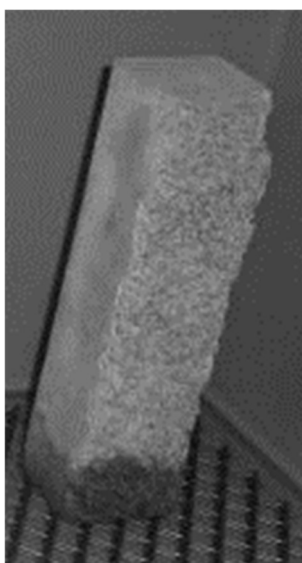
Tabulka 5: Rozměry a objemová hmotnost vzorků (HPC, TRC a C jsou pro λ , DHPC a DC pro μ a KHPC a KC pro zkoušku nasákavosti)

Textilní výztuž nemá zásadní vliv na objemovou hmotnost. Mezi HPC a TRC jsou rozdíly malé, které jsou způsobeny patrně chybami v měření.

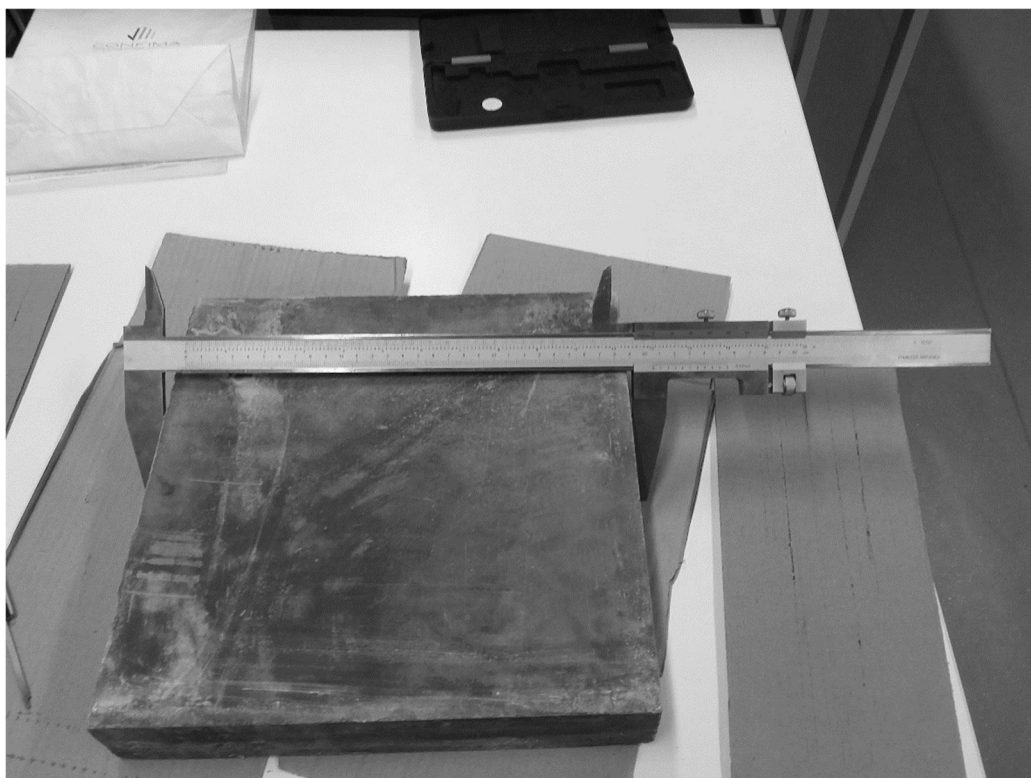


Obrázek 15: Graf objemové hmotnosti (HPC, TRC a C jsou pro λ , DHPC a DC pro μ a KHPC a KC pro zkoušku nasákavosti)

Graf znázorňuje všechny skupiny vzorků. Je zde vždy minimální, maximální a průměrná hodnota. Rozdíly u vysokohodnotného betonu nejsou nikterak velké, vzorky byli hladké, nevznikali zde velké nepřesnosti. Celkový průměr je 2280 kg/m³. U standardního betonu vznikali nepřesnosti v měření rozměrů, protože jeden z jejich povrchů není hladký, je zde viditelné kamenivo. Záleží tedy v jakém místě byl rozměr odečten. Celková průměrná hodnota je 2130 kg/m³.



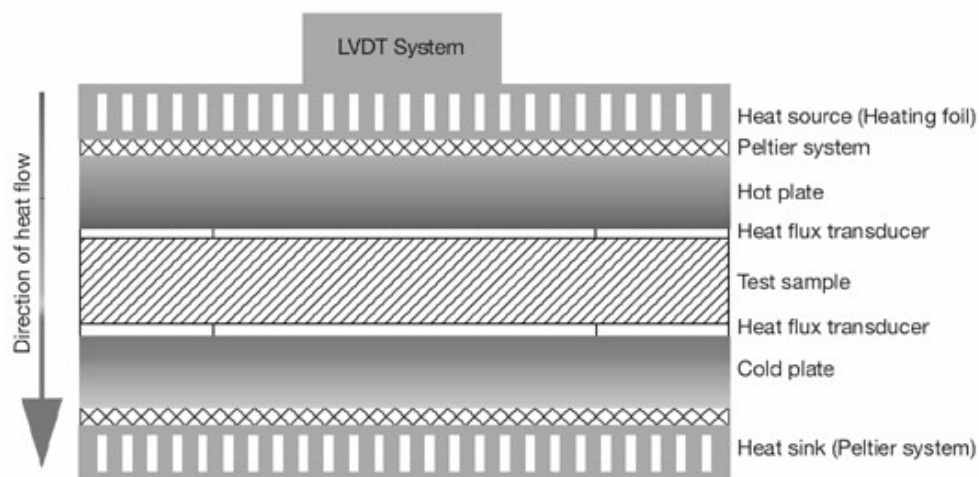
Obrázek 16: Povrch jednoho z vzorků KC



Obrázek 17: Měření rozměrů mechanickým posuvným měřítkem

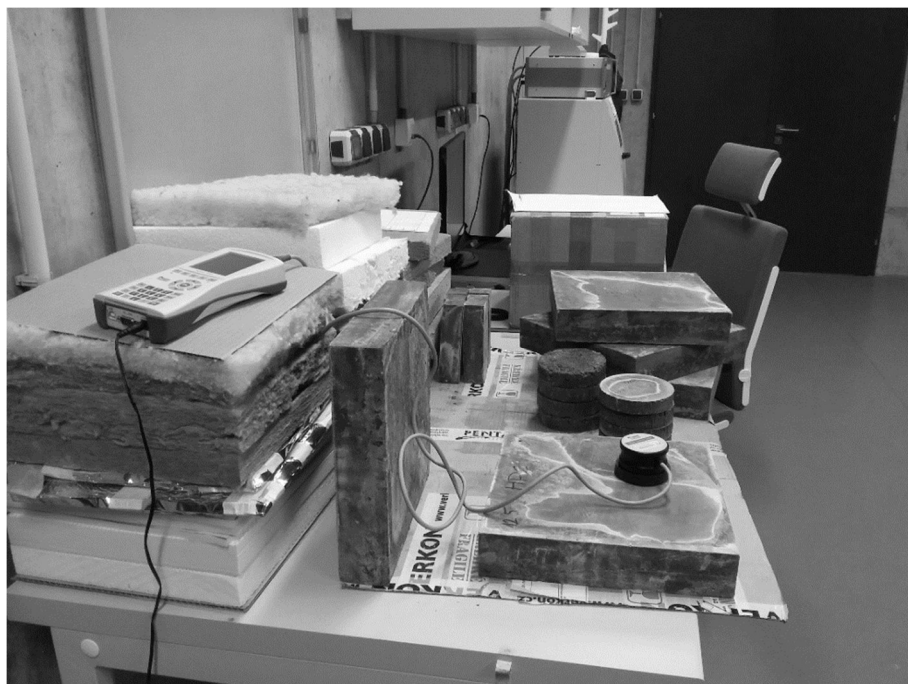
2.3. Součinitel tepelné vodivosti

Tato zkouška měla původně probíhat pomocí deskového přístroje HFM300. Tento přístroj je určen na přesné měření tepelné vodivosti vzorků ve tvaru desek. Principem je měření tepelného toku, který prochází kolmo zkoušenou deskou mezi vyhřívanou a chlazenou deskou přístroje. Podstatou zkoušky je šíření tepelného toku a rozdílů povrchových teplot vzorků za ustáleného tepelného stavu. Ze zjištěných hodnot, měrné plochy a tloušťky zkoušeného vzorku se vypočítá součinitel tepelné vodivosti. Bohužel tento přístroj nefunguje na naše materiály, ale spíše na izolační materiály a materiály s menší objemovou hmotností (10).



Obrázek 18: Princip deskového přístroje HFM 300

Měření součinitele tepelné vodivosti jsme tedy změřili pomocí multifunkčního zařízení ISOMET 2104 s plošnou sondou, které používá nestacionární měřicí metodu. Měřicí dobu jsme zredukovali na cca 15 min ve třech po sobě jdoucích měření.

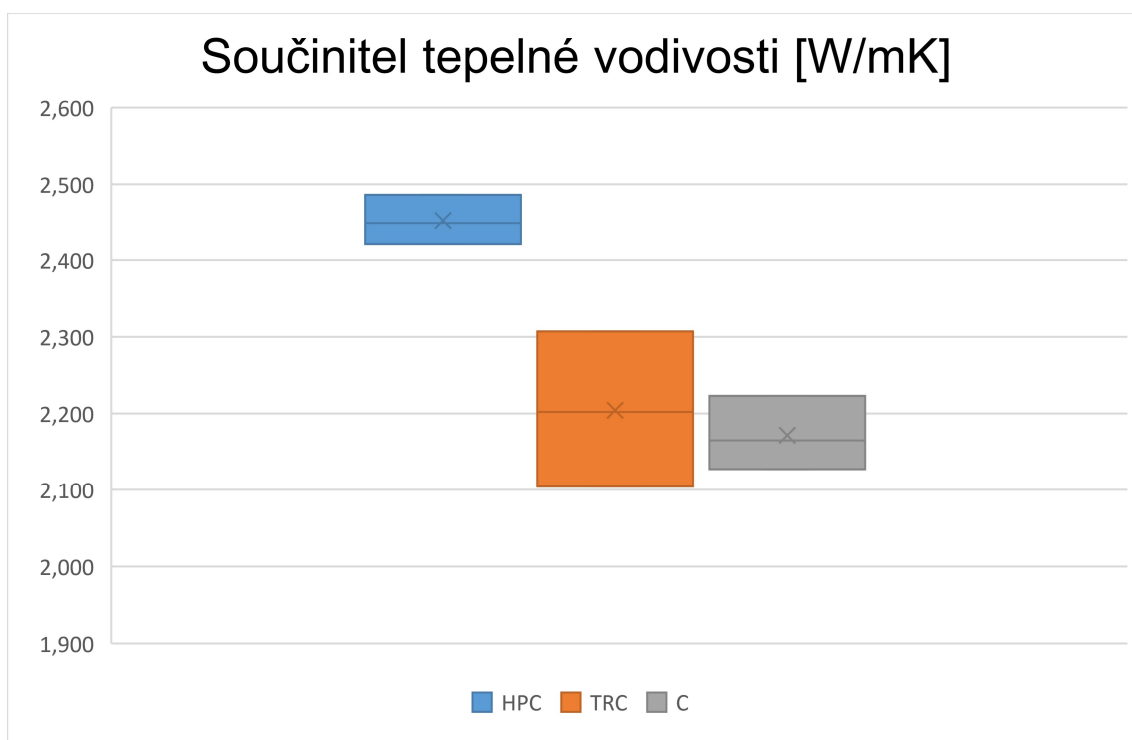


Obrázek 19: Měření součinitele tepelné vodivosti

Střední teplota: 23°C						
Vzorek	23. 6. 2016; průměr ze 3 měření			13.10.2016; nastaveno jedno měření		
	λ [W. m ⁻¹ . K ⁻¹]	ρc [J.m ⁻³ .K ⁻¹] x10 ⁺⁶	$\lambda/\rho c$ [m ² .s ⁻¹] x10 ⁻⁶	λ [W. m ⁻¹ . K ⁻¹]	ρc [J.m ⁻³ .K ⁻¹] x10 ⁺⁶	$\lambda/\rho c$ [m ² .s ⁻¹] x10 ⁻⁶
HPC1	2,4798	2,0863	1,1886	2,4220	1,7890	1,3500
HPC2	2,3507	1,8879	1,2453	2,4864	1,8890	1,3163
HPC3	2,1668	1,7591	1,2318	2,4400	1,8570	1,3140
TRC1	2,4558	2,1083	1,1648	2,3070	1,9816	1,1642
TRC2	2,2643	1,9390	1,1678	2,1043	1,8406	1,1433
TRC3	2,0110	1,7553	1,1457	2,1946	1,9543	1,1230
C1	2,9412	1,9506	1,5000	2,1273	1,6546	1,2857
C2	-	-	-	2,2230	1,7002	1,3075
C3	-	-	-	2,1446	1,7588	1,2193

Tabulka 6: Výsledky z Isometu v červnu a v říjnu

V tabulce jsou zapsány hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ [W. m⁻¹. K⁻¹], objemové měrné tepelné kapacity ρc [J.m⁻³.K⁻¹] x10⁺⁶ a podíl těchto dvou hodnot $\lambda/\rho c$ [m².s⁻¹] x10⁻⁶. Měření bylo provedeno několikrát, v tabulce je uvedeno měření z června a října. Jak je vidět z výsledků, tepelná vodivost ve většině případech postupem času zmenšuje. To je pravděpodobně dáno úbytkem vlhkosti ve vzorcích. Vzorky standardního betonu v červnu nebyli měřeny, zrovna ten den byli totiž vytáhnuti z vodní lázně, výsledky by tedy nebyli adekvátní (viz vzorek C1).



Obrázek 20: Graf součinitelů tepelné vodivosti

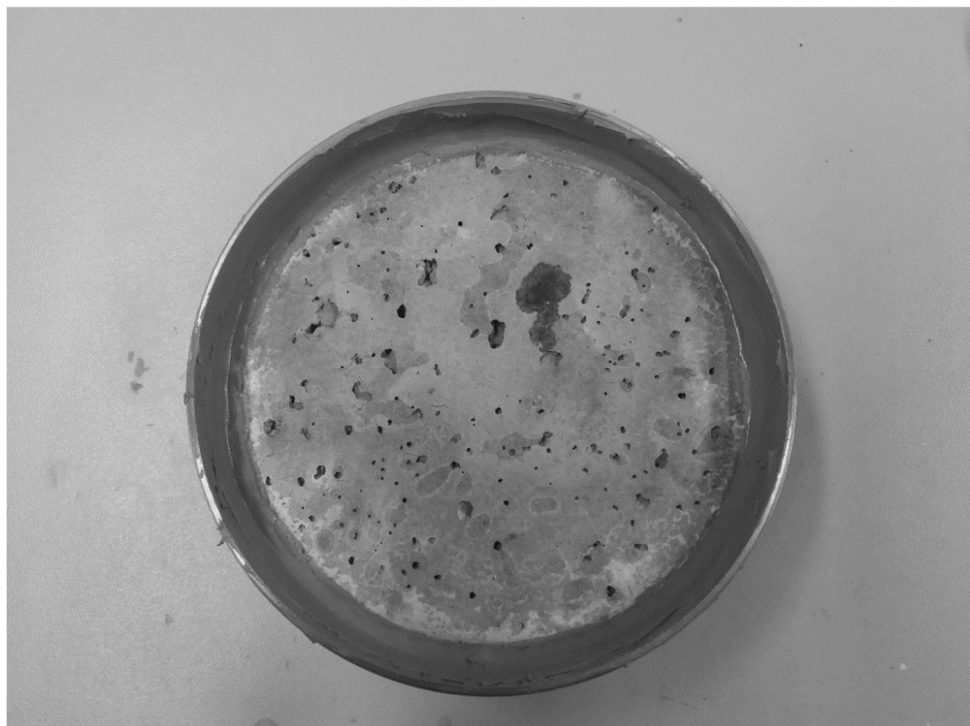
Graf ukazuje průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti s maximální a minimální naměřenou hodnotou. Chyby v měření způsobující různé hodnoty mohou vznikat díky nerovnostem na povrchu vzorku, nepřesnému přiložení měřící sondy, či dalším chybám v měření. Ve výpočtové části jsou uvažovány průměrné hodnoty. TRC má součinitel tepelné vodivosti 2,202 W/mK a standardní beton 2,165 W/mK.

2.4. Faktor difuzního odporu

K zjištění faktoru difuzního odporu jsme se rozhodli použít zkoušku metodou misek. Princip zkoušky spočívá ve vytvoření dvou prostředí s různými relativními vlhkostmi. Tato dvě prostředí jsou od sebe oddělena zkoušeným vzorkem. K tomu se používá speciálně tvarovaná miska, na jejíž dno se dává sůl k vytvoření specifického vlhkostního prostředí. Na ozub misky se položí vzorek a spára mezi miskou a vzorkem se řádně zatmelí (11).

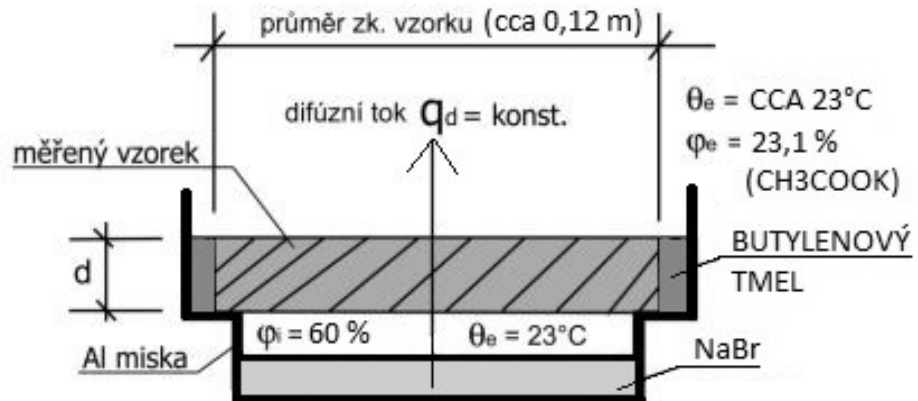


Obrázek 21: Vzorek a miska na zkoušku faktoru difuzního odporu



Obrázek 22: Vzorek připravený na zkoušku

Zkouška byla provedena podle interního návodu UCEEB (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov) od Ing. Jana Richtera: Difúzní vlastnosti stavebních materiálů – stanovení nejistot při měření v laboratoři stavební tepelné techniky, RP1 (viz příloha). Rozhodli jsme se použít hliníkové misky do kterých jsme nalili roztok bromidu sodného (NaBr), který má šedesáti procentní vlhkost. Vzorky se opřeli o zub misky a mezeru, mezi vzorkem a miskou jsme vyplnili stavbařským butylenovým tmelem. Takto připravené vzorky jsme zvážili a vložili do exikátoru s vlhkostí přibližně 23 %, kterou udržuje octan draselný (CH₃COOK). Vlhkost uniká přes vzorek z misky do exikátoru a měří se hmotnostní úbytky vlhkosti. Tento způsob probíhá při nízké relativní vlhkosti (cca 37%).



Obrázek 23: Schéma zkoušky při nízké relativní vlhkosti

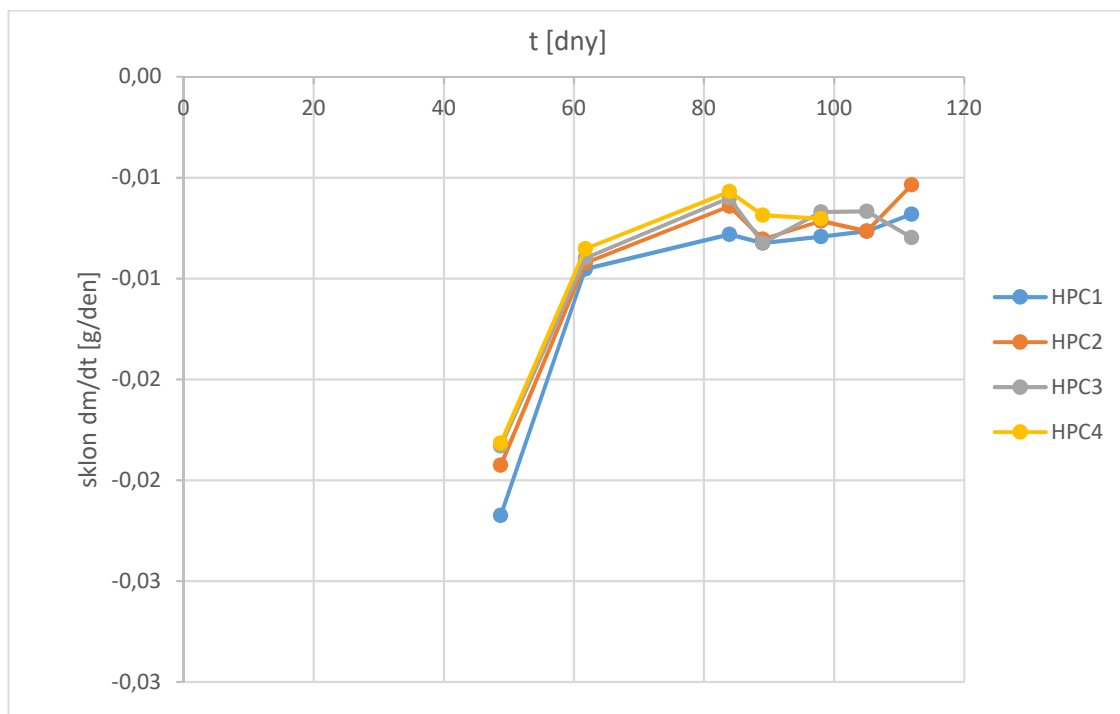
Misky se následně váží každých 4-7 dní a u každého vážení se запиše přesný datum, čas, teplota a relativní vlhkost vzduchu v exikátoru. Při vynesení úbytků/přírůstků hmotnosti misky v závislosti na čase, a při třech po sobě následujících měřeních, které budou dosahovat lineární závislosti, je možné test ukončit. Celá zkouška zpravidla trvá přibližně 6 týdnů (11).

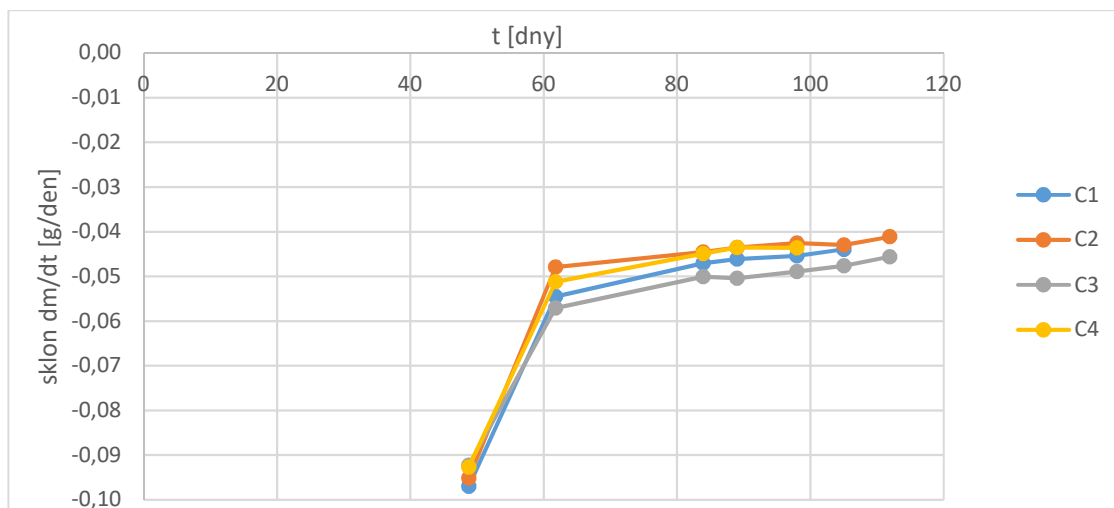


Obrázek 24: Exikátor

Hmotnost [g]								
měření	1	2	3	4	5	6	7	8
datum	23.6.16 15:00	11.8.16 9:00	24.8.16 9:30	15.9.16 13:10	20.9.16 15:30	29.9.16 14:30	6.10.16 15:45	13.10.16 13:30
dt [dny]	0	48,75	13,02	22,15	5,10	8,96	7,05	6,91
t [dny]		48,75	61,77	83,92	89,02	97,98	105,03	111,94
RH [%]		24,8	25,7	26,4	26,9	27,2	27,2	27,4
T [°]		23,8	23	22,9	23,6	23,6	23,6	22,4
HPC1	939,581	938,521	938,397	938,224	938,182	938,111	938,057	938,010
HPC2	891,434	890,495	890,375	890,233	890,192	890,128	890,074	890,037
HPC3	886,484	885,592	885,475	885,342	885,300	885,240	885,193	885,138
HPC4	878,373	877,488	877,377	877,251	877,216	877,153	-	-
C1	888,759	884,031	883,321	882,278	882,043	881,636	881,326	881,032
C2	895,132	890,494	889,870	888,883	888,661	888,280	887,977	887,693
C3	904,384	899,888	899,145	898,036	897,779	897,341	897,005	896,690
C4	910,686	906,166	905,499	904,504	904,282	903,891	-	-

Tabulka 7: Navážené hmotnosti vzorků





Obrázek 25: Grafy sklonů hmotnostních úbytků

Na grafech, jenž vycházející z tabulky hmotnostních úbytků, je vidět sklon hmotnostních úbytků v čase. Poslední 4 měření jsou již lineární proto mohl být proveden výpočet. Výpočet faktoru difuzního odporu byl spočten z šestého měření. Nejprve výsledky u HPC vycházely překvapivě vysoké. Nejspíš nastala chyba v měření, pravděpodobně ve vlhkosti solného roztoku v misce. Rozhodli jsme se vyvrtat do jednoho vzorku od každého materiálu díru a vlhkost ověřit. Byla však v pořádku. Po zkontrolování výsledků s Janem Richtrem jsme měli jasno. Korekce hmotnosti založená na úbytcích hmotnosti z misky přes stěnu misky a skrz tmel se v tomhle případě nepoužívá. Hliníková miska a butylenový tmel jsou dokonale těsný. Po opravách už výsledky dávali smysl.



Obrázek 26: Kontrola vlhkosti v misce

K výpočtu je potřeba znát relativní vlhkost v misce (RH_{cup}), průměrnou relativní vlhkost ($RH_{desic,avg}$) a teplotu vzduchu ($T_{desic,avg}$) v posledním měřeném úseku. Ze změřených hmotností se vypočte změna hmotnosti vzorků v čase. Z teploty vzduchu se vypočte nasycená koncentrace vodní páry a z té potom koncentrace vodní páry v misce a v exikátoru. Difuzní odpor je potom vypočten jako součin času, plochy

vzorku, difuzní vodivosti nehybného vzduchu a rozdílu těchto tlaků děleno tloušťkou vzorku a hmotnostním úbytkem – viz následující vztah.

$$\mu_i = \frac{\delta_p \cdot \Delta\tau \cdot A \cdot \Delta p}{d_i \cdot \Delta m_{i,sam}}$$

Faktor difuzního odporu standardního betonu a HPC je stanoven aritmetickým průměrem ze všech vzorků. Dále byli stanoveny nejistoty měření. Standardní nejistoty představují rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty. Jsou rozděleny na typ A a na typ B. Nejistota typu A je způsobována náhodnými chybami s neznámou příčinou. Tato nejistota vzniká z opakovaného počtu měření. Nejistota typu B má příčinu známou a odhadnutelnou. Patří sem nejistota vah, stanovení tloušťky vzorku ($u_{B,d}$), difuzně otevřené plochy vzorku ($u_{B,A}$), stanovení částečného tlaku vodní páry ($u_{B,\Delta p}$) a rozdílu hmotností v posledním časovém úseku ($u_{B,\Delta m}$). Z těchto nejistot se vypočte celková nejistota typu B a ta se potom zkombinuje s nejistotou typu A na kombinovanou nejistotu podle následujícího vztahu.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Nakonec se kombinovaná nejistota vynásobí koeficientem k_U , který je pro normální (Gaussovo) rozdělení roven dvěma, a vznikne tak výsledná rozšířená nejistota. Celý výpočet i s nejistotami je proveden v programu MS Excel a přiložen jako příloha k práci. V následující tabulce je přehled výsledků (11).

	HPC	Concrete
μ_1 [-]	735,4	138,4
μ_2 [-]	901,1	147,9
μ_3 [-]	946,9	128,6
μ_4 [-]	894,3	144,1
$\underline{\mu}$ [-]	869,4	139,8
μ_A [-]	102,7	9,3
$\mu_{B,d}$ [m]	1,15E-05	
$\mu_{B,A}$ [m ²]	0,000012	
$\mu_{B,\Delta p}$ [Pa]	64,5	
$\mu_{B,\Delta m}$ [kg]	8,16E-06	
μ_B [-]	123,9	9,8
μ_C [-]	160,9	13,6
$\underline{\mu}$ [-]	321,8	27,1

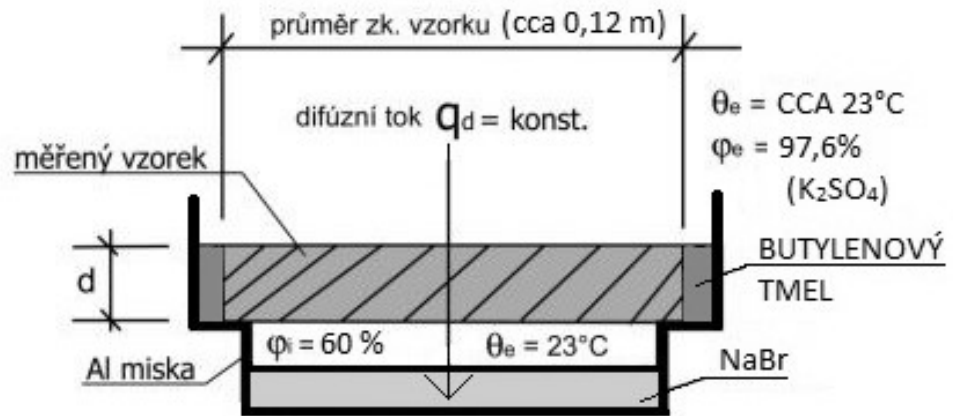
Tabulka 8: Přehled výsledků faktoru difuzního odporu při nižší průměrné relativní vlhkosti

$$\mu_{HPC} = 869 \pm 322$$

$$\mu_C = 140 \pm 27$$

Vysoká nejistota u HPC je způsobena hlavně nejistotou typu A, kterou zapříčiňují velké rozdíly u jednotlivých vzorků (735 ÷ 947).

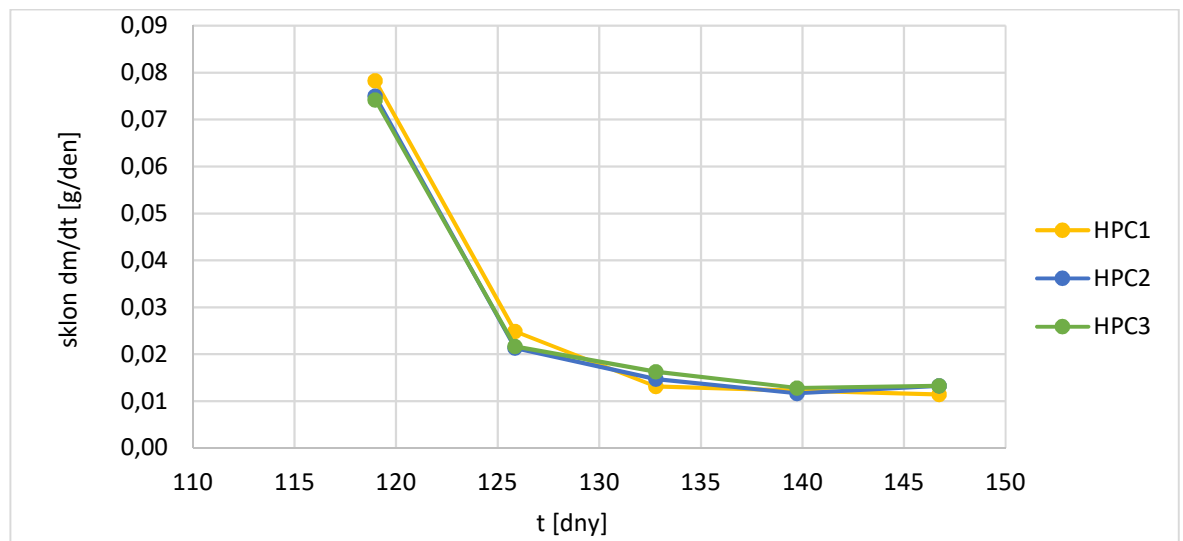
Po osmém měření byla sůl v exikátoru (octan draselný – CH₃COOK) vyměněna za síran draselný (K₂SO₄), který navodí vlhkost 97,6 %. Difuzní tok se obrátí a vlhkost bude proudit z exikátoru do misky. Budeme tedy vážit hmotnostní přírůstky. Tento způsob zkoušky probíhá při vysoké relativní vlhkosti (cca 78,8 %).

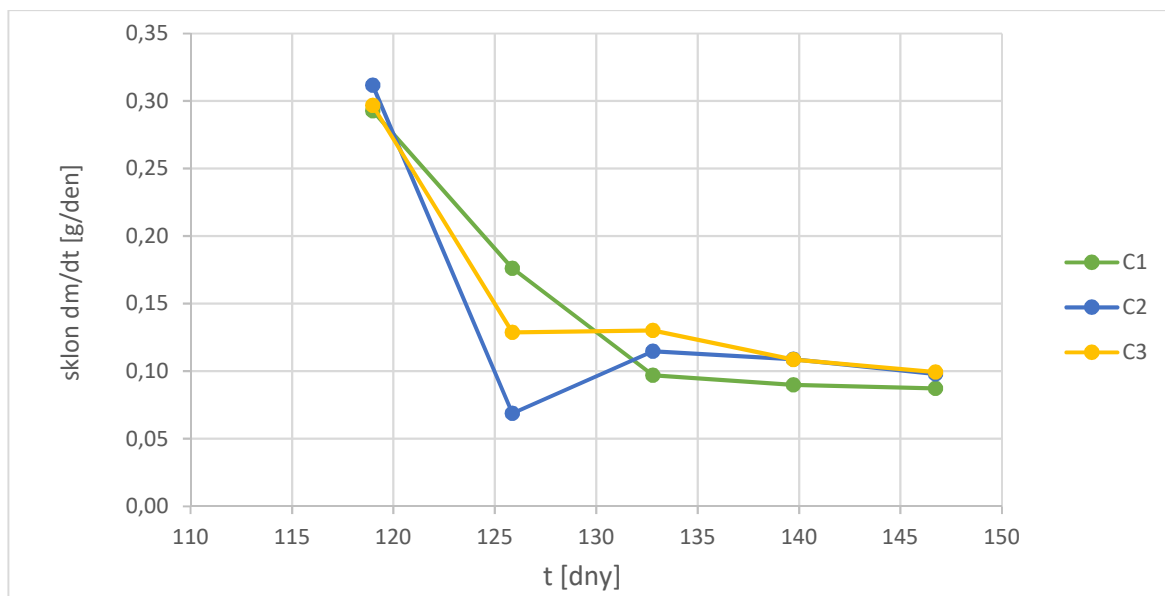


Obrázek 27: Schéma zkoušky při vysoké relativní vlhkosti

Hmotnost [g]						
měření	8	9	10	11	12	13
datum	13.10.16 13:30	20.10.16 14:25	27.10.16 11:35	3.11.16 9:55	10.11.16 8:30	17.11.16 8:25
dt [dny]	7	7,04	6,88	6,93	6,94	7,00
t [dny]	111,94	118,98	125,86	132,79	139,73	146,73
RH [%]	27,4	94,8	95		98,5	99,1
T [°]	22,4	22,8	22,7	22,5	22,3	22,3
HPC1	938,01	938,561	938,732	938,823	938,908	938,988
HPC2	890,037	890,565	890,712	890,814	890,895	890,988
HPC3	885,138	885,660	885,809	885,922	886,011	886,104
C1	881,032	883,093	884,306	884,978	885,602	886,213
C2	887,693	889,886	890,360	891,155	891,911	892,596
C3	896,69	898,779	899,666	900,568	901,322	902,017

Tabulka 9: Navážené hmotnosti vzorků





Obrázek 28: Grafy sklonů hmotnostních příbytků

Z grafů je vidět, že po pěti váženích je sklon hmotnostních příbytků již lineární. Z posledního (13.) měření byl proveden výpočet faktoru difuzního odporu včetně nejistot měření. Výpočet je na stejném principu jako v předchozím případě. Vzhledem k vyšší průměrné relativní vlhkosti byli očekávány nižší hodnoty faktoru difuzního odporu.

	HPC	Concrete
μ_1 [-]	561,8	79,4
μ_2 [-]	533,8	70,8
μ_3 [-]	525,8	69,8
$\underline{\mu}$ [-]	540,4	73,3
μ_A [-]	21,3	5,7
$\mu_{B,d}$ [m]	1,15E-05	
$\mu_{B,A}$ [m ²]	0,000012	
$\mu_{B,\Delta p}$ [Pa]	64,5	
$\mu_{B,\Delta m}$ [kg]	8,16E-06	
μ_B [-]	59,6	4,6
μ_C [-]	63,2	7,3
$\underline{\mu}$ [-]	126,5	14,6

Tabulka 10: Přehled výsledků faktoru difuzního odporu při vyšší průměrné relativní vlhkosti

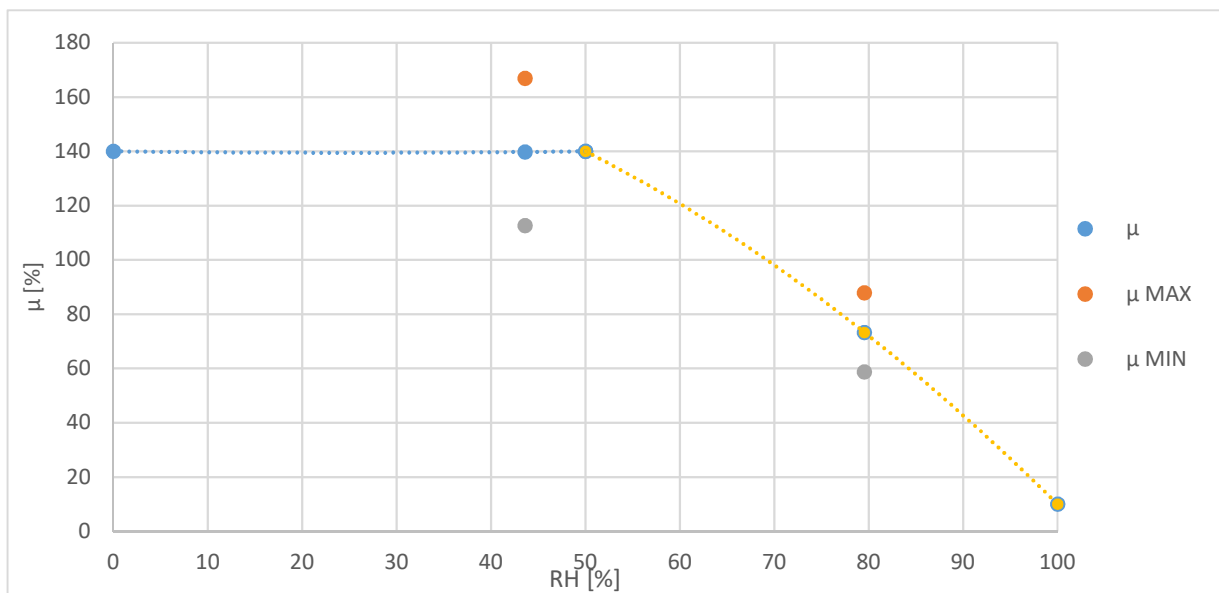
$$\mu_{HPC} = 540 \pm 126$$

$$\mu_C = 73 \pm 15$$

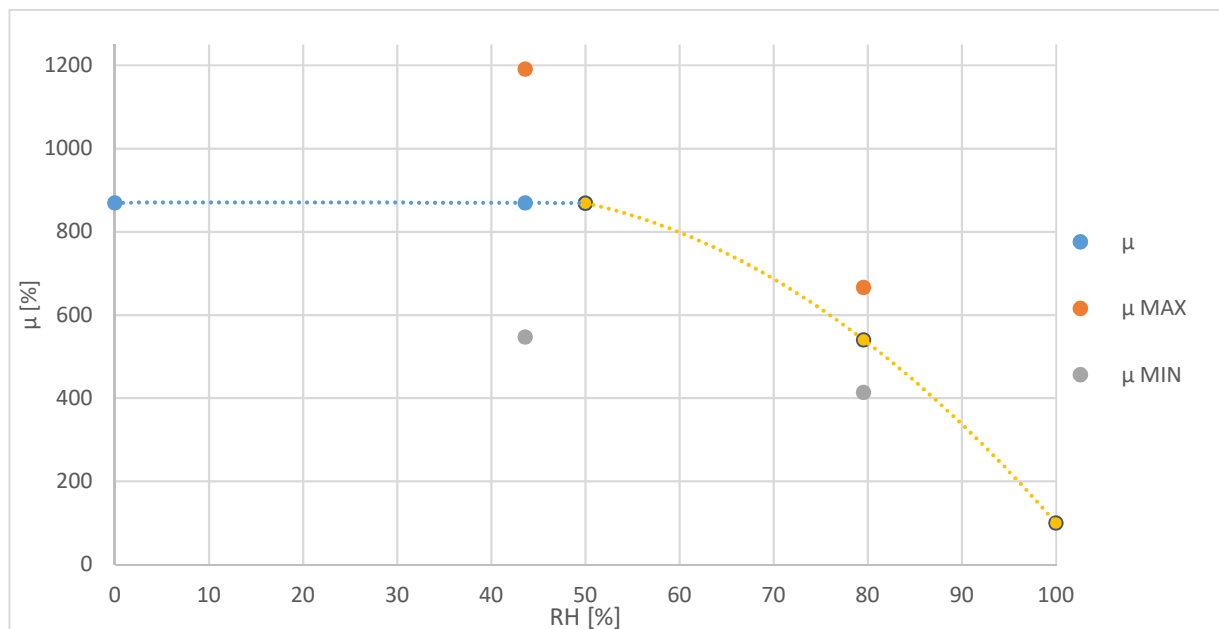
Podle předpokladu jsou výsledky opravdu nižší. U standardního betonu jsme klesli skoro na polovinu první hodnoty. To je nejspíše dáno tím, že při vyšší relativní vlhkosti je prostup vodních pár materiálem snazší. V následující tabulce je přehled výsledků u standardního betonu a HPC u obou zkoušek metodou misek.

RH [%]	HPC			Concrete		
	μ [-]	μ_{MAX} [-]	μ_{MIN} [-]	μ [-]	μ_{MAX} [-]	μ_{MIN} [-]
80	540	667	414	73	88	59
44	869	1191	548	140	167	113

Tabulka 11: Souhn výsledků faktoru difuzního odporu.



Obrázek 29: Graf předpokládaného průběhu faktoru difuzního odporu u standardního betonu



Obrázek 30: Graf předpokládaného průběhu faktoru difuzního odporu u HPC

Grafy ukazují předpokládaný průběh faktoru difuzního odporu u standardního betonu a u HPC. Díky malému množství vody u HPC jsou zrna pevného skeletu blízko sobě. HPC má tedy malou pórovitost (a zároveň velmi tenké póry). Nejsou-li póry, voda nemá kudy projít, proto je propustnost pro vodní páru nižší než v případě standardního betonu. Standardní směs betonu obsahuje více vody, než je teoreticky potřeba na hydrataci cementu. Přebytková voda se postupně odpaří a zbydou póry (větší průměr pórů než v případě HPC). Těmito póry posléze může voda cestovat snadněji. Proto mají směsi s vyšším poměrem vody ku cementu vyšší faktor difuzního odporu.

2.5. Kapilární vztlínavost

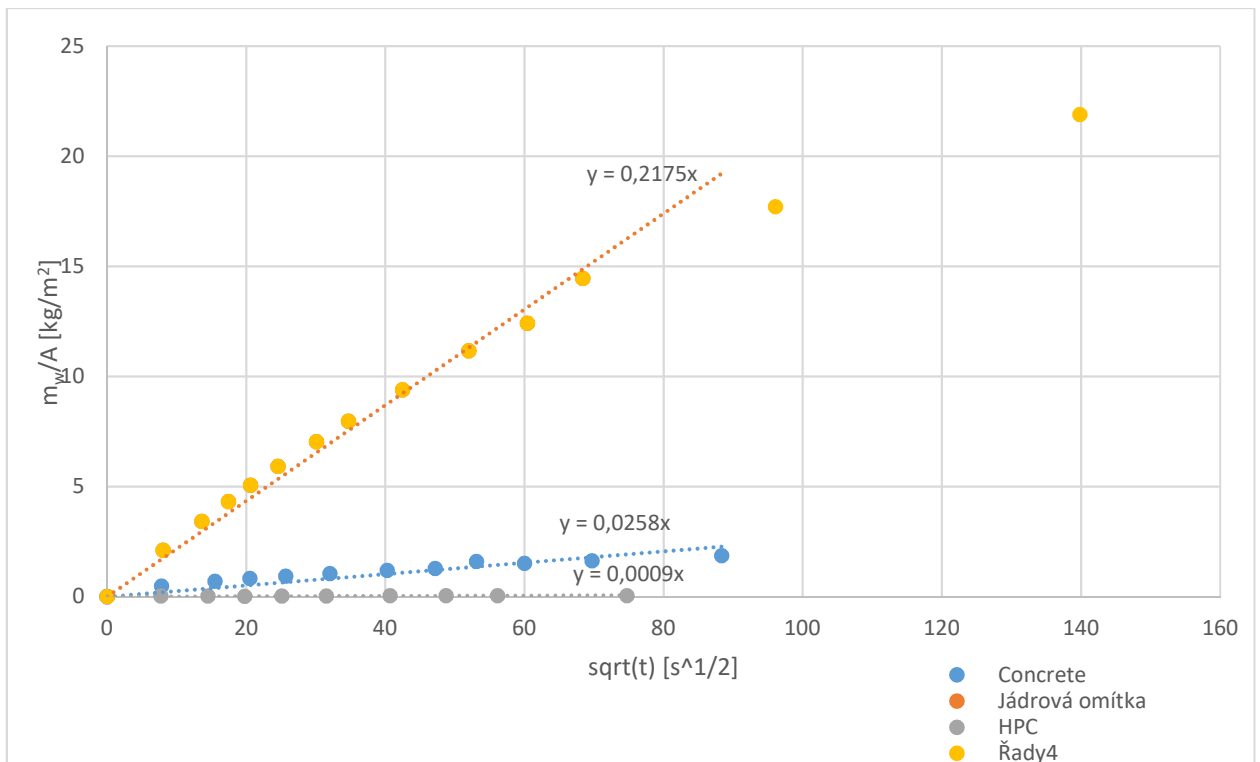
Poslední zkouška je zaměřena na kapilární vztlínavost materiálu. Metoda je založena na tzv. kapilární elevaci (tj. vztlínání kapalin v kapiláře). K této zkoušce slouží vzorky o rozměru 40x40x160 mm. Zkouška probíhá tak, že se vzorek položí do nádoby, kde je po dně destilované vody (max. 5 mm) a po časových úsecích se měří přírůstkem hmotnosti. Časové úseky jsou ze začátku krátké (1 min, 2 min, 3 min). Postupem času jsou delší a delší (1 hod až dny). V průběhu zkoušky by hmotnostní přírůstky měli mít lineární průběh. Pozorujeme, jak postupuje hranice nasáknutí vzorku, a měří se postup hranice vody. Zkouška by měla být zakončena, když vzorek dojde do stavu kapilárního nasycení, tedy až se hranice vody dostane na druhý konec vzorku. V tomto čase by mělo dojít ke zlomu funkce hmotnostních přírůstků. Vzorek je kapilárně nasycen a přijímá minimální množství vody.



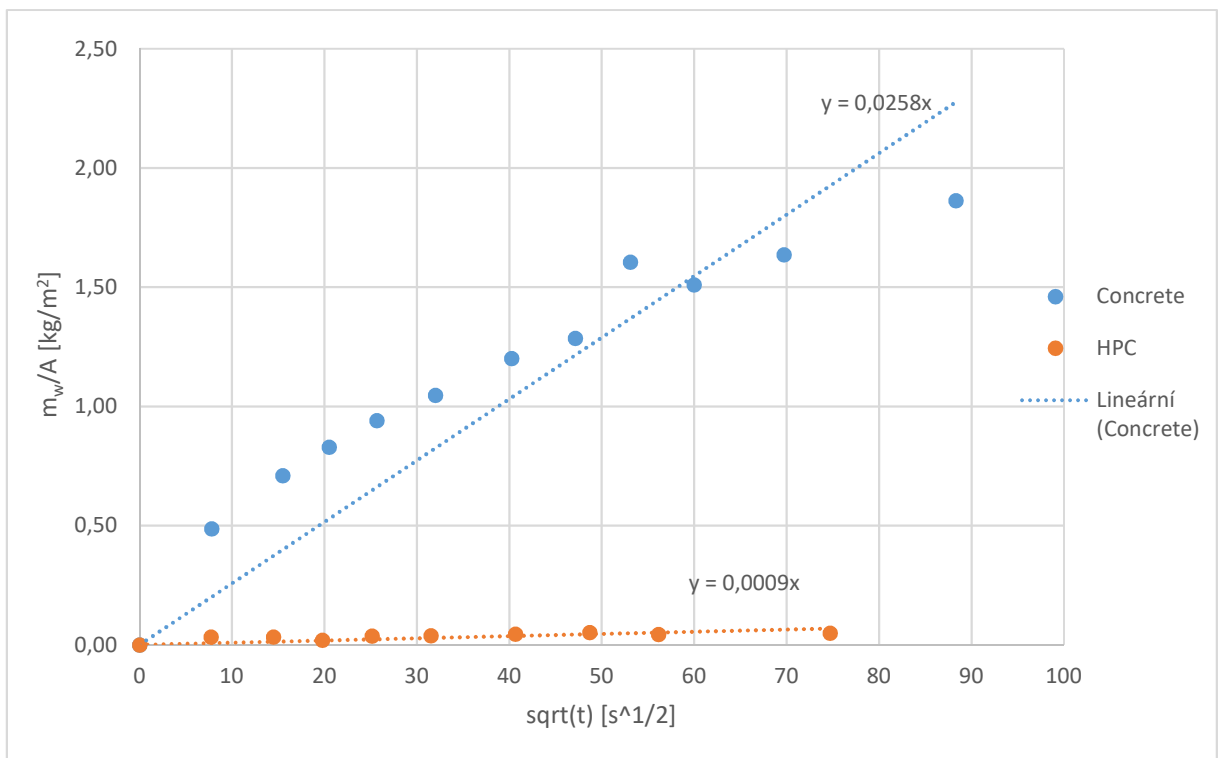
Obrázek 31: Zkouška kapilární vztlínavosti

První zkouška proběhla v demineralizované kohoutkové vodě na vzorcích omítky VPC, standardního betonu a HPC bez zakrytých stran. Po každém vyjmutí z lázně se vzorky zespoda utrou do hadru a zváží na přesné váze. Na prvním grafu můžete vidět závislost změny hmotnosti na čase. Jak je vidět, oba betony (standardní i HPC) jsou málo nasákavé. HPC je téměř nenasákavý, při jeho vážení vznikaly chyby a stalo se, že následující vážení mělo menší váhu než předešlé. Na druhém grafu pro upřesnění je jen beton a HPC.

Po 7 dnech se do vzorku z HPC vážícího na počátku 890,8 g dostalo jen 0,2 g vody, to znamená 0,122 kg/m². Tento materiál můžeme brát jako nenasákavý, jeho hmotnostní nasákavost je pouhých 0,02 %. Naproti tomu vzorek ze standardního betonu, který zpočátku vážil 564,45 g, nasál za tuto dobu 5,16 g vody, tedy 3,23 kg/m², nasákavost je 0,9 %. Docela jiné je to v případě jádrové omítky, za podobnou dobu se do vzorku s původní hmotností 433,55 g nasálo 50,1 g vody a to je 31,33 kg/m², nasákavost rovna 12 %. Výsledky jsou vidět na následujících grafech.

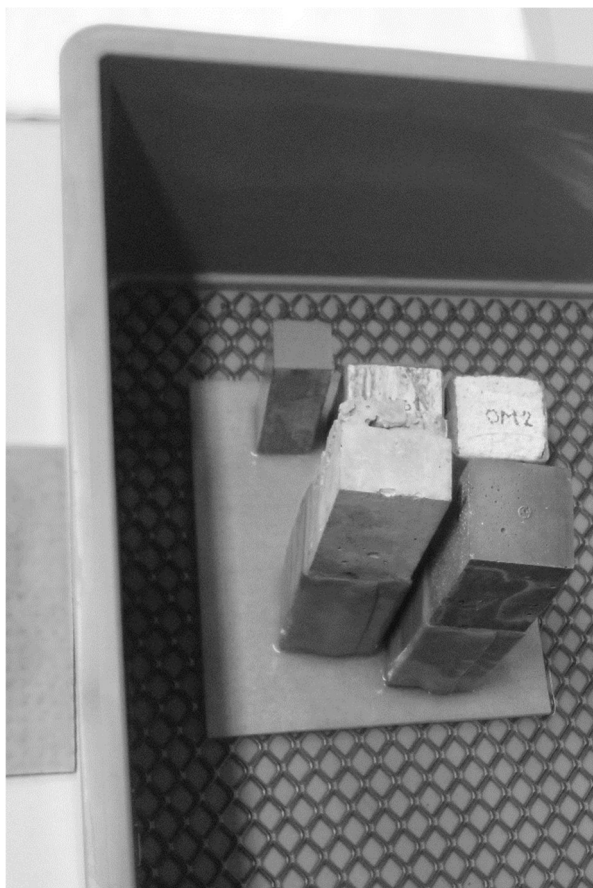


Obrázek 32: Graf nasákavosti omítky, betonu a HPC

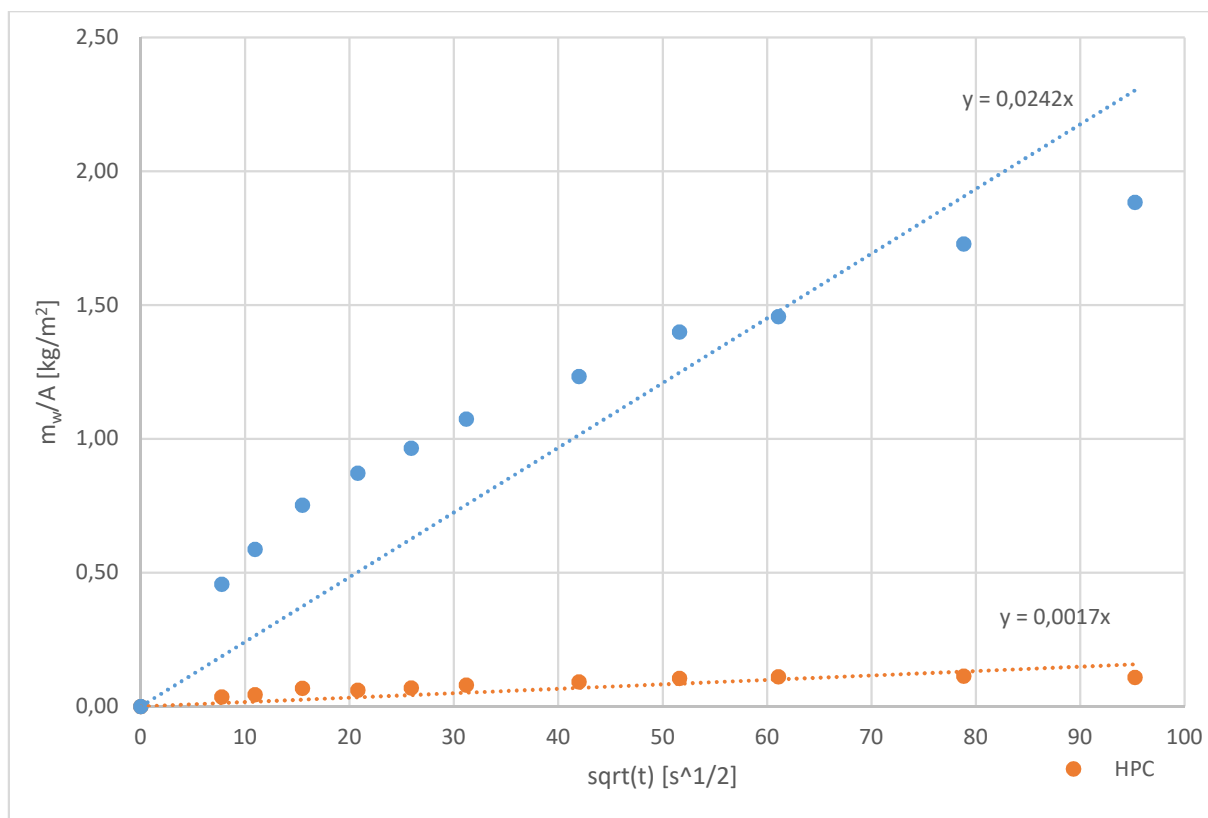


Obrázek 33: Graf nasákavosti betonu a HPC

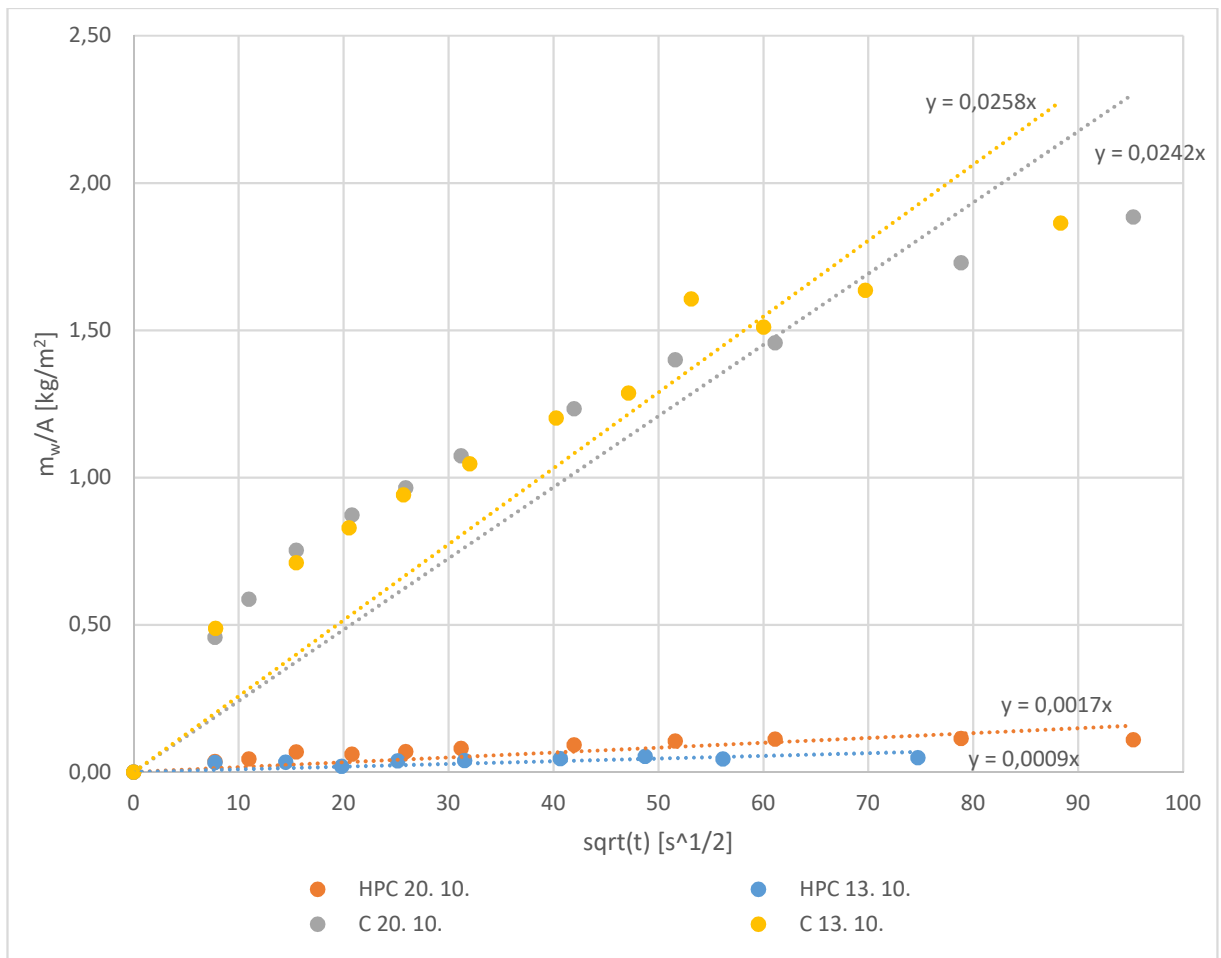
Na těch to grafech je vidět, že oba betony jsou málo nasákavé. U jádrové omítky můžeme pozorovat chování podle předpokladu, nejprve lineární průběh nasákavosti a při dosažení kapilárního nasycení zlom. Betony v se takhle nechovají, průběh jejich nasákavosti se nedá popsat jako lineární a ke zlomu také nedochází. HPC je prakticky nenasákavý a standardnímu betonu by trvalo dlouhou dobu, než by došel do stavu kapilárního nasycení. Druhá zkouška probíhala v destilované vodě s oblepenými stranami vzorků butylovou páskou.



Obrázek 34: Zkouška kapilární vztlivnosti u vzorků oblepených butylovou páskou



Obrázek 35: Graf nasákavosti HPC a betonu



Obrázek 36: Rozdíl mezi první zkouškou a druhou

Destilovaná voda se do vzorků dostávala snáze. U HPC je tento vliv vidět ztelně, stále se však do vzorku dostává tak málo vody, chyby vážení se velmi projevují na výsledku. Standardní beton vypadá podobně jako u první zkoušky, musíme brát v úvahu, že se do něj voda dostávala jen spodní stranou vzorku, a ne i stěnami jako to bylo v předchozím případě. Po 7 dnech od namočení byla zkouška zakončena. Za tuto dobu se do vzorku standardního betonu vážícího 615,4 g nasálo 10,6 g vody, tedy 6,64 kg/m² a hmotnostní nasákavost je 1,72 %. HPC s hmotností 623,3 g přijalo 0,26 g vody, to odpovídá 0,16 kg/m² s nasákavostí 0,041 %.

Z grafů můžeme vyčíst hodnotu součinitele absorpce vody, je to sklon proložené přímky (spojnice trendu). Nejde o přesnou hodnotu nasákavosti, můžeme ji ale určit řádově. U jádrové omítky to je 0,2 kg/m²s^{0,5}, u standardního betonu 0,02 kg/m²s^{0,5} a u HPC 0,001 kg/m²s^{0,5}. Z vyzkoumaných údajů plyne, že na rozdíl od jádrové omítky je nasákavost betonu velmi malá. Lze konstatovat, že vysokohodnotný beton je nenasákavý materiál.

Použití HPC jako externí vrstvy fasády bude mít své nevýhody. Jelikož je materiál nenasákavý, tak při dešti bude všechna voda stékat po fasádě, žádná se nevsákne. Fasáda tedy bude náročná na detaily. Místa jako parapet, okenní a dveřní otvory, a i sokl budou více namáhány než v případě klasické skladby s jádrovou omítkou. Důkladnost bude také třeba v místech styků fasádních panelů.

3. Výpočtová část

3.1. Parametry materiálů

3.1.1. Objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti

Při výpočtech byli použity průměrné hodnoty, které jsme získali při laboratorním zkoumání. Hodnoty jsou objasněny v předešlé kapitole. Objemová hmotnost TRC je 2280 kg/m^3 , standardního betonu 2130 kg/m^3 . Součinitel tepelné vodivosti má TRC $2,202 \text{ W/mK}$ a standardní beton $2,165 \text{ W/mK}$.

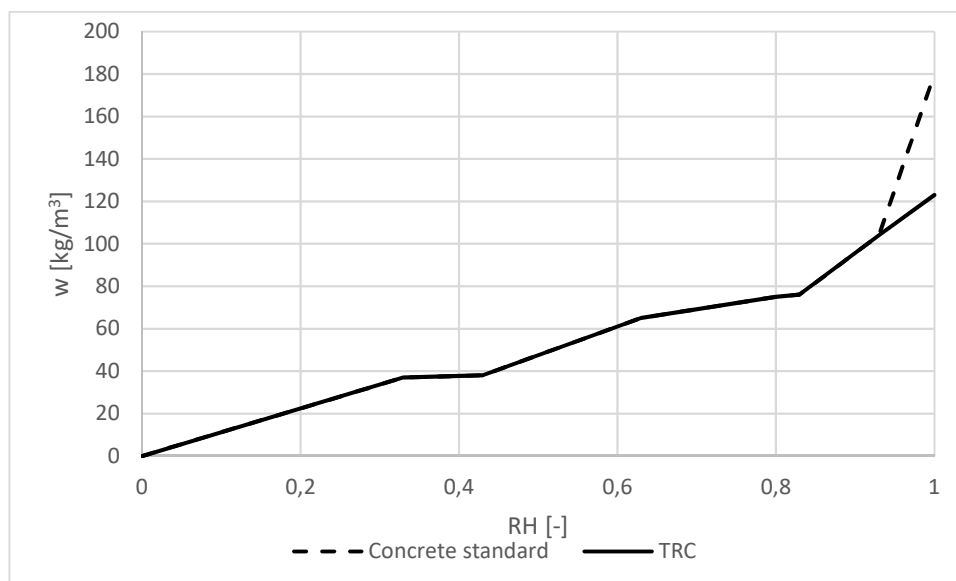
3.1.2. Sorpční izoterma

Sorpční křivka nebyla u těchto materiálů měřena, byla převzata z programu wufi pro beton C35/45 a upravena, aby seděla k porositě TRC a standardnímu betonu, která byla odhadnuta z objemové hmotnosti a hustotě pevných částic (2600 kg/m^3).

Concrete standard		TRC	
RH [-]	w [kg/m^3]	RH [-]	w [kg/m^3]
0	0	0	0
0,33	37	0,33	37
0,43	38	0,43	38
0,63	65	0,63	65
0,8	75	0,8	75
0,83	76	0,83	76
0,93	104	0,93	104
1	180	1	123

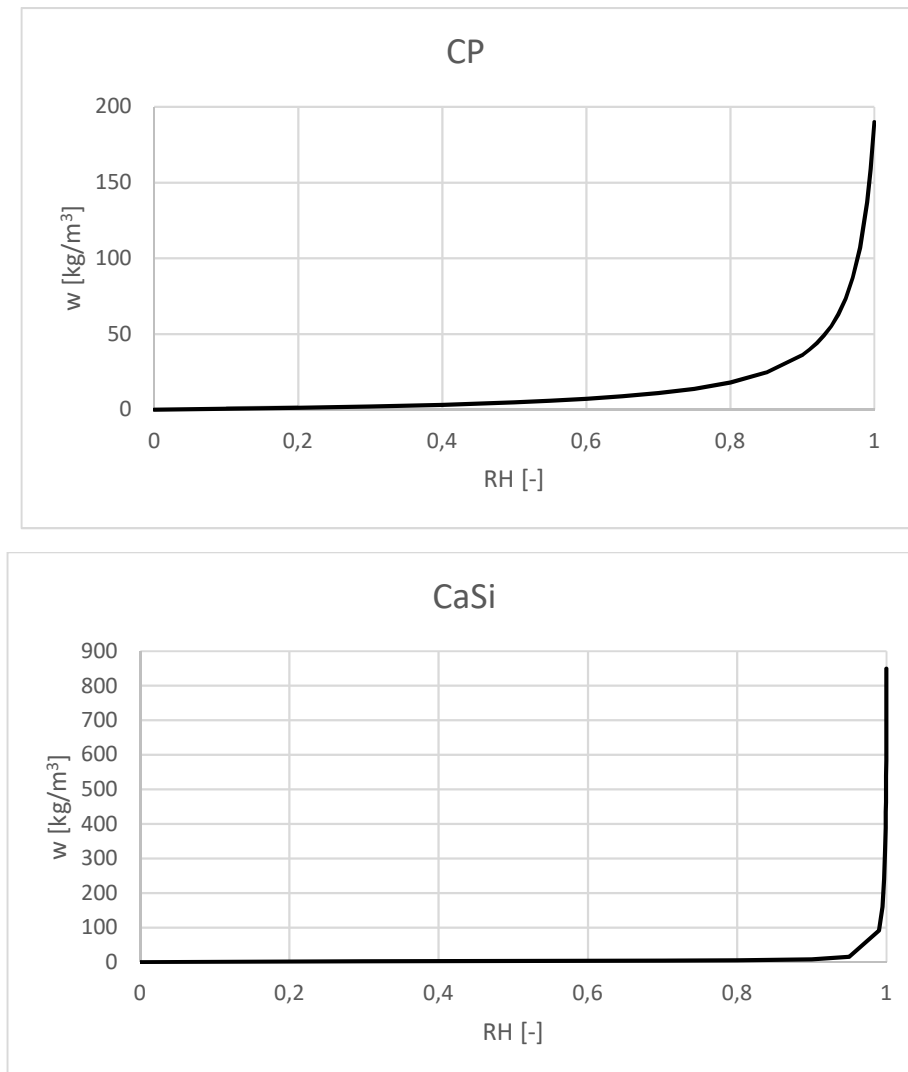
Tabulka 12: Relativní vlhkost a vlhkost standardního betonu a TRC

Hodnoty jsou tedy stejné až na w_{cap} , který je u každého materiálu jiný. Je závislý na porositě odhadnuté z objemové hmotnosti v suchém stavu a hustoty materiálu. „Pórovitost neboli porosita jest vlastnost těles, jejichž prostor není hmotou vyplněn docela, nýbrž mezi částčkami hmotnými jeví větší nebo menší mezery, řečené póry, často makroskopicky malé, jimiž hmoty kapalně nebo vzdušné mohou proniknouti“ (12). Porosita standardního betonu je 0,1808. Porosita TRC je 0,1231. Sorpční křivky jsou vidět na grafech.



Obrázek 37: Sorpční křivka standardního betonu a TRC

V programu Wufi jsou u některých pokusů přidány materiály pro srovnání s betonem. Jedná se o cihlu pálenou a kalcium silikát (CaSi). Jejich sorpční křivky mají zcela jiný průběh.

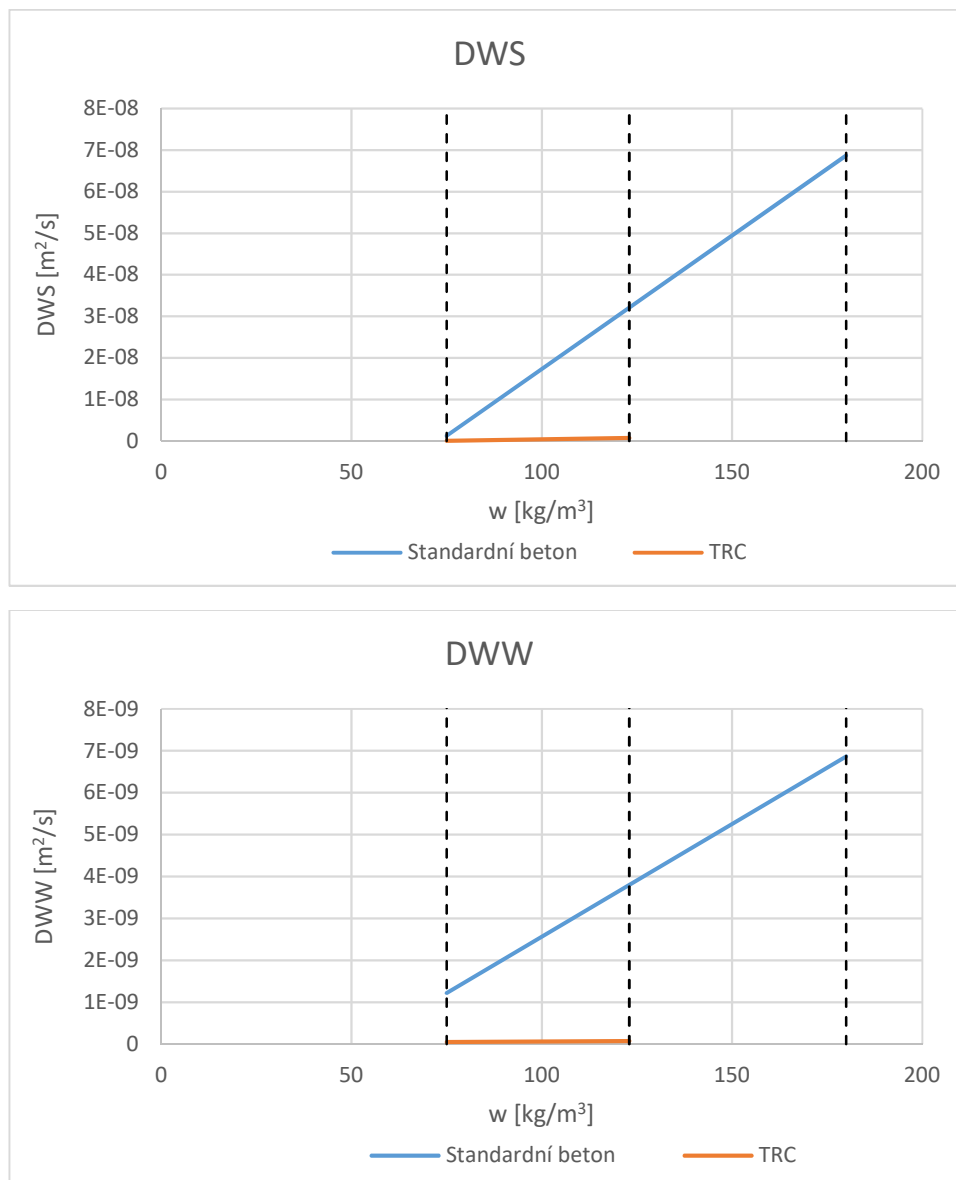


Obrázek 38: Sorpční křivka cihly pálené a CaSi

„Sklon sorpční křivky se nazývá vlhkostní kapacita. Tato materiálová vlastnost je analogická měrné tepelné kapacitě. Sklon sorpční křivky se mění, takže i vlhkostní kapacita se mění. Prakticky u všech stavebních materiálů lze nicméně nalézt téměř lineární průběh sorpční křivky v oblasti mezi 20 % a 70 % relativní vlhkostí“ (13). Podle sklonu sorpční křivky je jasné, že cihla pálená a CaSi mají velmi malou vlhkostní kapacitu za běžných relativních vlhkostí a ukládají jen malé množství vody. U těchto dvou materiálů je podstatná nadhygroskopická oblast ($0,98 < \varphi < 1$), kdy jsou do sebe schopny uložit většinu vody. V hygroskopické oblasti je to pouze minimální množství.

3.1.3. DWW a DWS

Dalším důležitým parametrem je součinitel vlhkostní vodivosti: $k=D_w=(A/w_{cap})^2$. A je absorpční koeficient vody, počítali jsme ho v kapitole kapilární vztlínavosti. Pro standardní beton je $A=0,0242 \text{ kg/m}^3\text{s}^{0,5}$ a pro TRC je $A=0,0017 \text{ kg/m}^3\text{s}^{0,5}$. V programu wufi se pomocí tohoto součinitele a vlhkostí v kapilárním nasycení dopočítává součinitel transportu kapalné vlhkosti pro sání (DWS) a pro redistribuci (DWW).

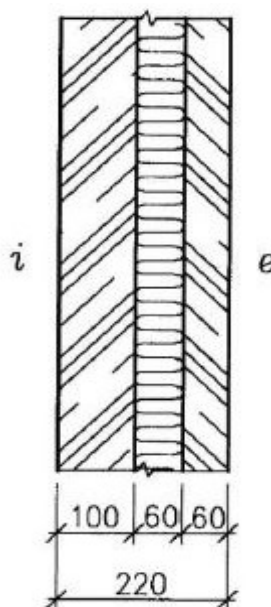


Obrázek 39: Součinitel transportu kapalné vlhkosti, sání a redistribuce pro standardní beton a TRC

Při sání jsou hodnoty větší než při redistribuci. To jsme mohli pozorovat i při zkoušce kapilární vztlínavosti. Nejdříve vzorky přijímali vlhkost rychleji, později, kdy docházelo k pronikání vlhkosti dále do vzorku (tedy redistribuci), přijímali vlhkost pomaleji.

3.2. Návrh v programu Teplo 2010

Pro návrh konstrukcí z TRC bude sloužit jako výchozí, referenční varianta jedna z původních skladeb klasických panelových domů. Jako referenční varianta byl vybrán železobetonový panel tloušťky 100 mm, zateplen 60 mm izolací z EPS 70 s ochrannou vrstvou tloušťky 60 mm ze železobetonu. Tato skladba se používala od roku 1972, patří do soustavy TOX a její název je T06B (14). Do výpočtu byl zvolen standardní beton s vlastnostmi naměřenými v předchozí kapitole. Pro faktor difuzního odporu byli zvoleny hodnoty z druhé zkoušky, při větší relativní vlhkosti. Vnitřní povrchová vrstva je sádrová omítka tloušťky 10 mm.



Obrázek 40: Skladba panelového domu T06B ze soustavy TOX

Tato skladba má součinitel prostupu tepla $U=0,568 \text{ W/m}^2\text{K}$, nesplňuje tedy normový požadavek dle ČSN 73 0540-2:2011 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky $U_{N,20}=0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jako první varianta je použita podobná skladba jako referenční, místo železobetonové ochranné omítky je však použit panel z TRC tloušťky 24 mm. Její součinitel prostupu tepla je $U=0,573 \text{ W/m}^2\text{K}$. Druhá varianta je stejná jako první s tím rozdílem, že izolace z EPS má tloušťku 240 mm, aby splnila současné požadavky na tepelný odpor obvodového pláště. Součinitel prostupu tepla je $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$, to je doporučená hodnota pro pasivní budovy.

Počáteční podmínky byly zvoleny standardní: vnitřní teplota $21 \text{ }^\circ\text{C}$, vnitřní vlhkost 55 %, vnější teplota $-13 \text{ }^\circ\text{C}$ a vnější vlhkost 84 %. Třída vnitřní vlhkosti byla vybrána 4. třída (vysoká vlhkost), to simuluje výměnu oken v budově. U starých oken byla vysoká infiltrace venkovního suchého vzduchu, který snižoval vnitřní vlhkost. Nová plastová okna jsou mnohem těsnější a tím se zvyšuje vnitřní vlhkost.

„Norma ČSN 73 0540-2 v čl. 6.1.1 požaduje, aby byly bez kondenzace vodní páry uvnitř konstrukce navrženy všechny konstrukce, u kterých by zkondenzovaná vodní pára ohrozila jejich požadovanou funkci. Splnění tohoto požadavku se prokazuje výpočtem s použitím návrhové venkovní teploty a návrhové teploty a vlhkosti vnitřního vzduchu. U ostatních konstrukcí dovoluje kondenzaci za těchto podmínek:

- 1) zkondenzovaná vodní pára neohrozí požadovanou funkci konstrukce
- 2) ve stavební konstrukci nesmí v roční bilanci kondenzace a vypařování zůstat žádné zkondenzované množství vodní páry $M_{c,a}$, které by zvyšovalo vlhkost konstrukce (tj. na konci modelového roku musí platit $M_{c,a} = 0 \text{ kg/m}^2$.
- 3) roční množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}$ musí být nižší než limit $M_{c,a,N}$, který činí:

o $M_{c,a,N} = 0,10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ nebo 3 % plošné hmotnosti materiálu, v němž dochází ke kondenzaci (nižší z hodnot) pro jednovrstevné střechy, pro konstrukce s dřevěnými prvky, pro konstrukce s kontaktním zateplením a pro další konstrukce s málo propustnými vnějšími vrstvami

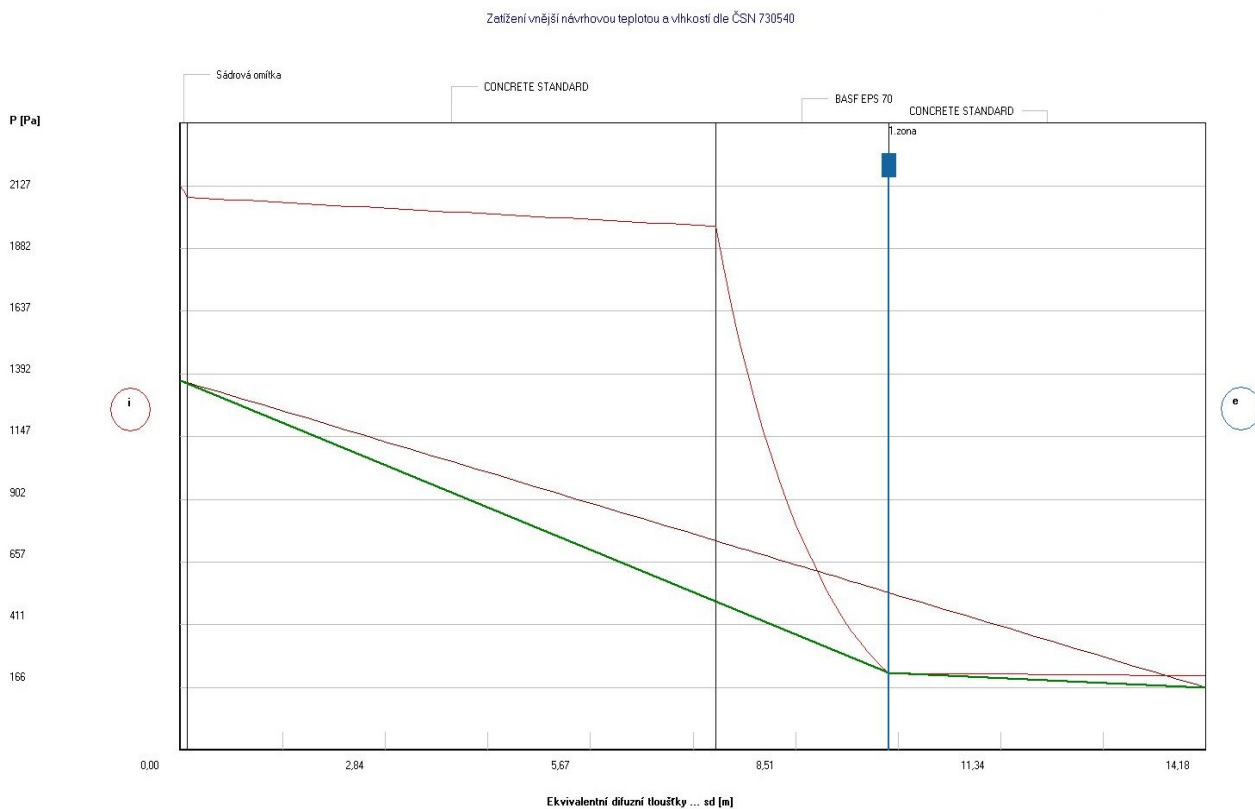
o $M_{c,a,N} = 0,50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ nebo 5 % plošné hmotnosti materiálu, v němž dochází ke kondenzaci (nižší z hodnot) pro ostatní stavební konstrukce“ (15).

Program Teplo počítá množství zkondenzované vodní páry podle dvou norem. V následující tabulce je výsledek podle normy ČSN 730540, která počítá celkové zkondenzované množství za rok. Je zde uvedeno, zda skladba splňuje podmínky či ne.

	$M_{C,A} [\text{kg}/\text{m}^2\text{rok}]$	$M_{EV,A} [\text{kg}/\text{m}^2\text{rok}]$	$\rho_p [\text{kg}/\text{m}^2]$	3 % z ρ_p	splňuje
REF	0,103	0,486	354,8	10,644	ne
VAR 1	0,176	0,24	281,9	8,457	ne
VAR 2	0,094	0,184	284,8	8,544	ano

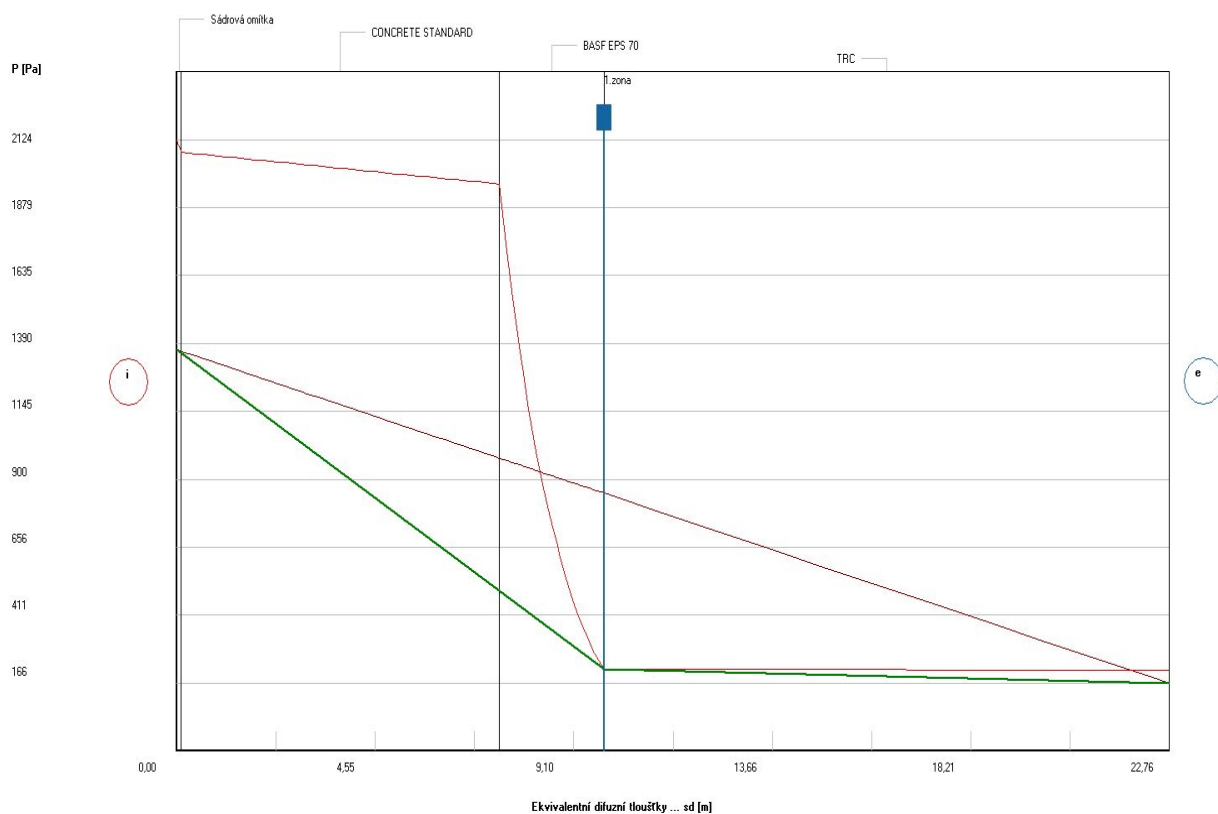
Tabulka 13: Výsledky dle ČSN 730540

Referenční varianta ani varianta 1 nespĺňujú súčasné požiadavky na prostup tepla a kondenzaci vodní páry. Obě skladby mají množství vypařitelné vodní páry za rok ($M_{EV,A}$) větší než množství zkondenzované vodní páry ($M_{C,A}$), teoreticky by měli být na konci modelového roku měli suché. Nespĺňujú však limit celkového množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a,N}=0,10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Rozdíl mezi těmito variantami je v ekvivalentní difuzní tloušťce (s_d). Ačkoliv má TRC panel menší tloušťku než standardní beton, jeho ekvivalentní difuzní tloušťka je podstatně větší. TRC má totiž mnohem větší faktor difuzního odporu. Vodní pára kondenzuje na rozhraní EPS a vnějšího betonu. Obrázky pod textem znázorňují průběh tlaků vodní páry v konstrukci. Vrchní křivka je nasycený tlak, prostřední křivka teoretický tlak a spodní je skutečný tlak. Dále je zde vyznačena kondenzační zóna.



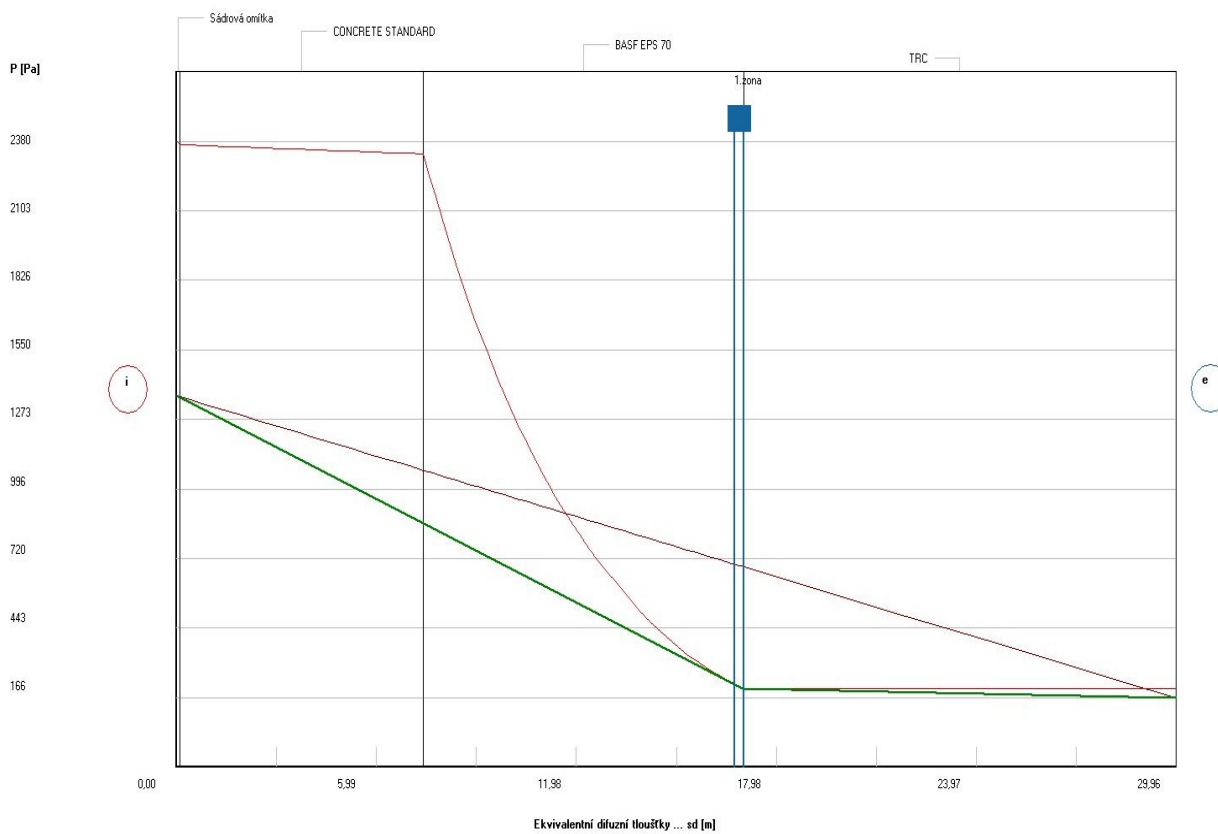
Obrázek 41: Tlak vodní páry v konstrukci, varianta REF

Zetížení vnější návrhovou teplotou a vlhkostí dle ČSN 730540



Obrázek 42: Tlak vodní páry v konstrukci, varianta 1

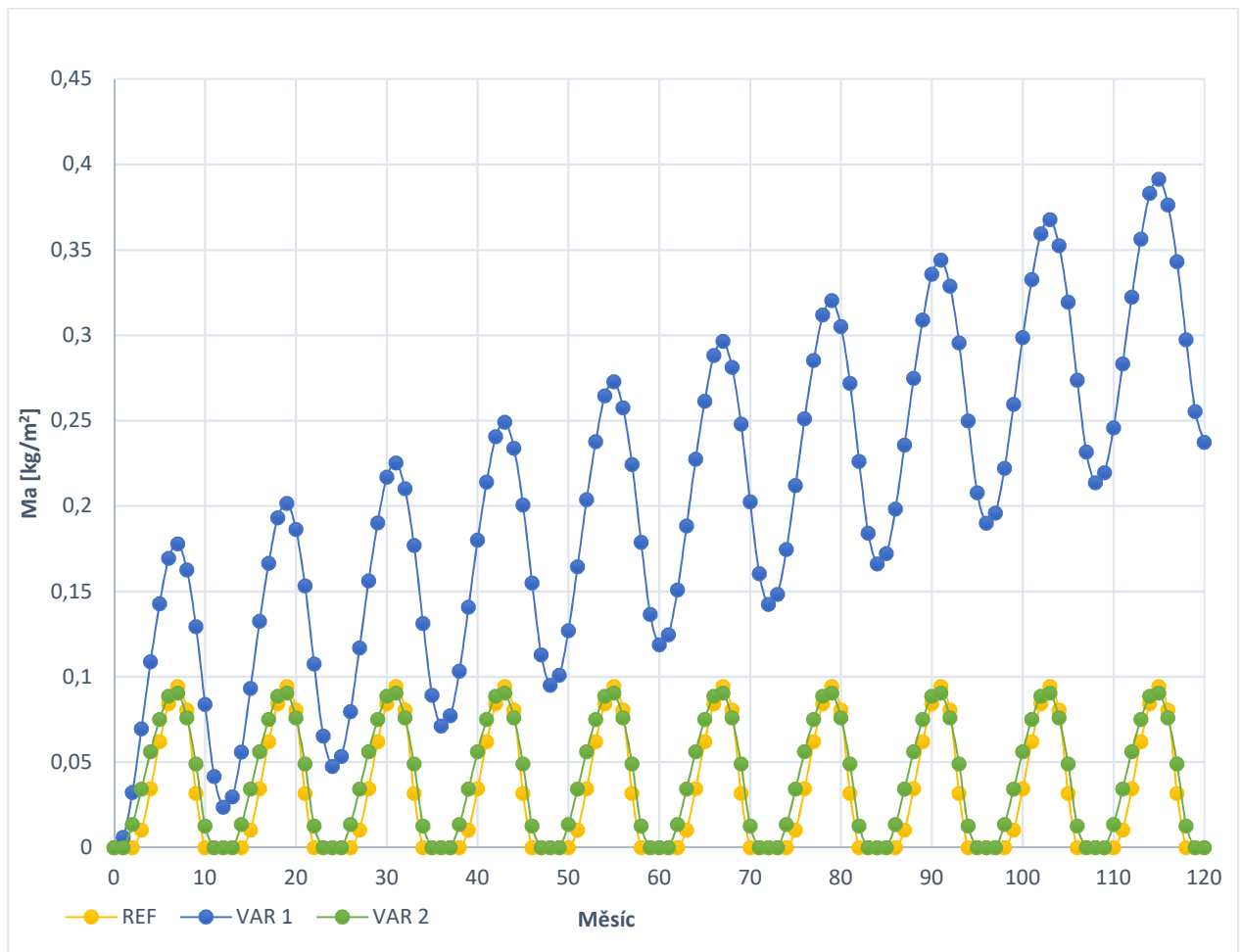
Zetížení vnější návrhovou teplotou a vlhkostí dle ČSN 730540



Obrázek 43: Tlak vodní páry v konstrukci, varianta 2

Varianta 2 má tloušťku izolace o 180 mm větší než varianta 1 a proto má konstrukce také větší ekvivalentní difuzní tloušťku. Díky tomu není změna tlaku tak „strmá“ jako u varianty 1 a množství zkondenzované vody splňuje roční limit. Kondenzační zóna se o kousek přesunula dál do polystyrenu.

Norma ČSN EN ISO 13788 počítá množství zkondenzované vodní páry po měsíci. Následující graf ukazuje průběh ve všech třech skladbách během deseti let. Dle této normy referenční varianta a varianta 2 splňuje limit maximálního množství zkondenzované vodní páry za rok. Referenční varianta má o něco více kondenzátu, ale zase rychleji vysychá. Varianta 1 podle této normy nesplňuje ani podmínku maximálního množství kondenzátu a ani nedojde během roku k vysušení konstrukce. Každým rokem se zvyšuje naakumulované množství vody, časem by mohlo dojít i k porušení některých funkcí konstrukce (únosnost spojovacích prvků, koroze, ...).



Obrázek 44: Graf vlhkosti v konstrukcích

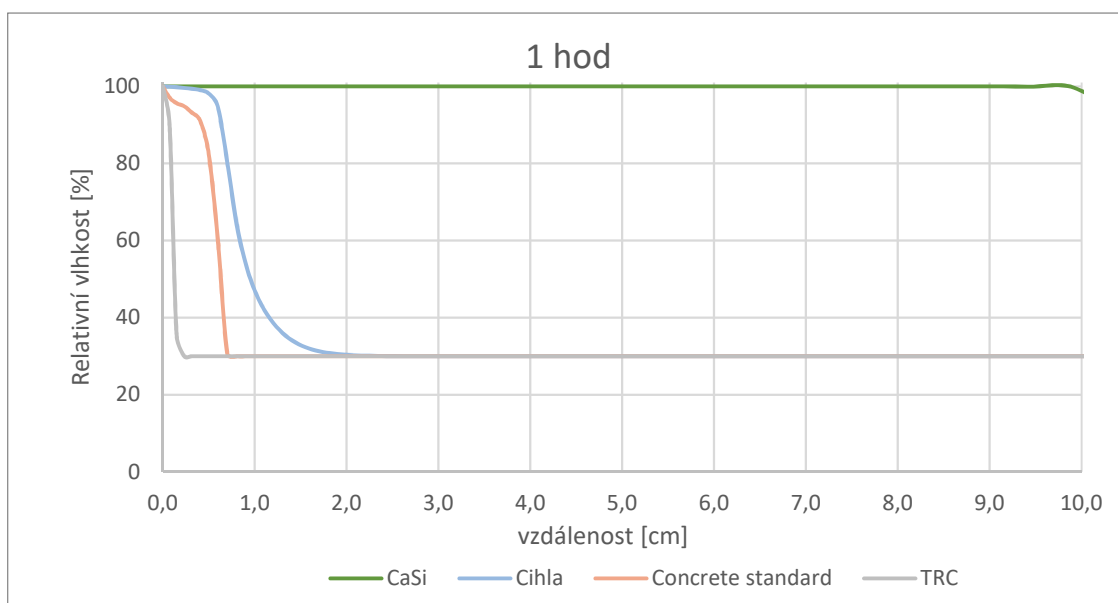
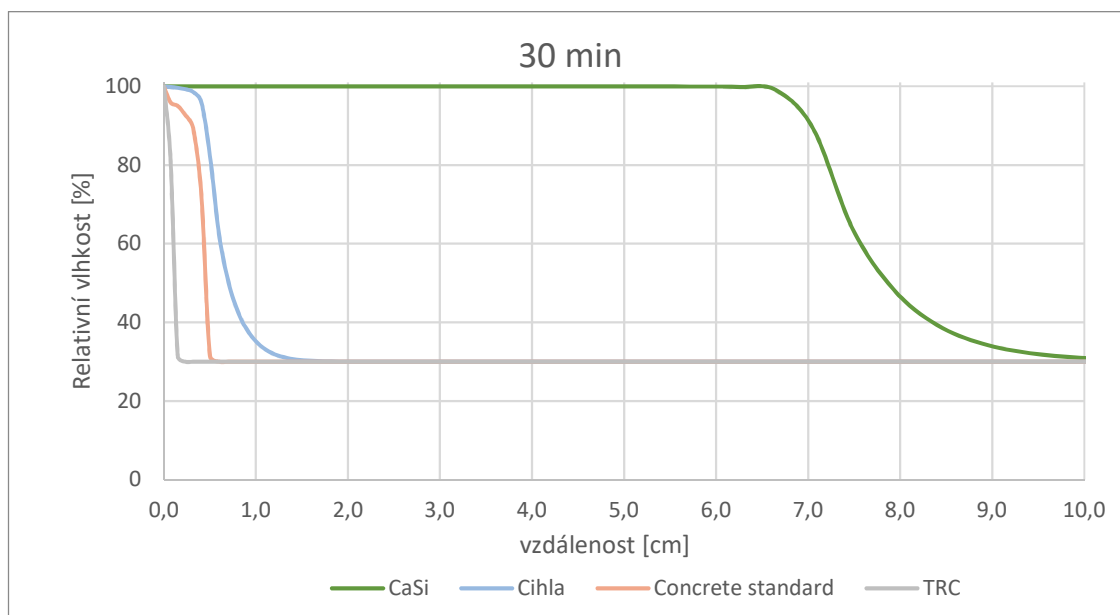
Program teplo bohužel nepočítá vlivy jako sluneční svit, déšť, orientaci na světové strany a podobně. Nesimuluje tedy skutečné chování konstrukce. Další kapitola je o návrhu v programu WUFI, který s těmito vlivy počítá.

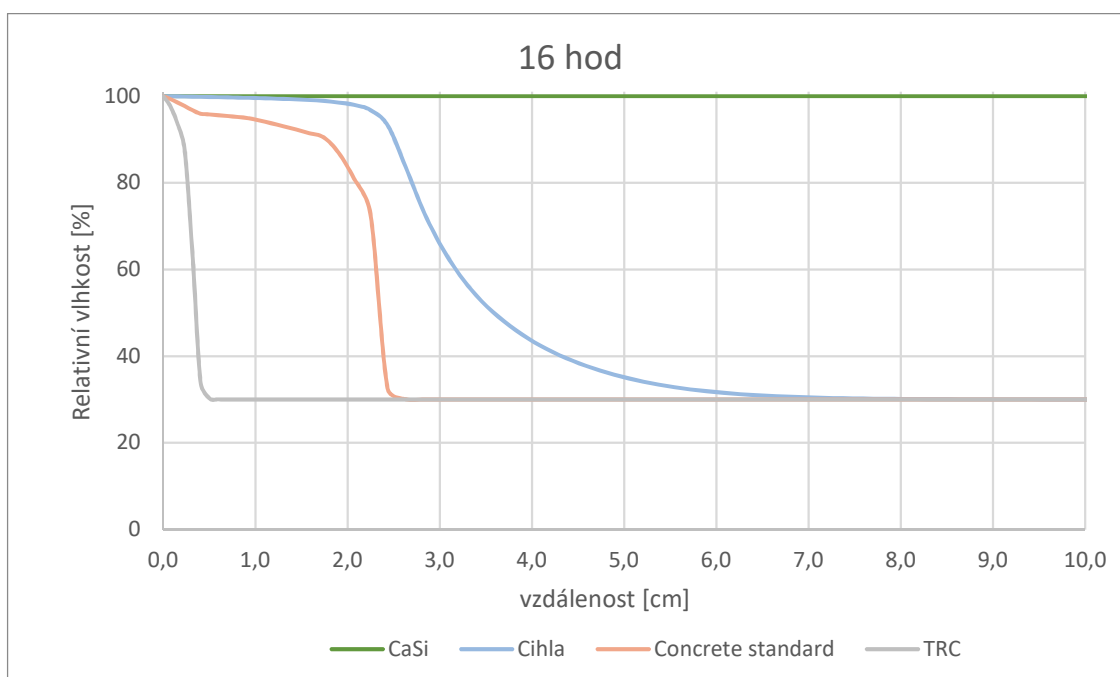
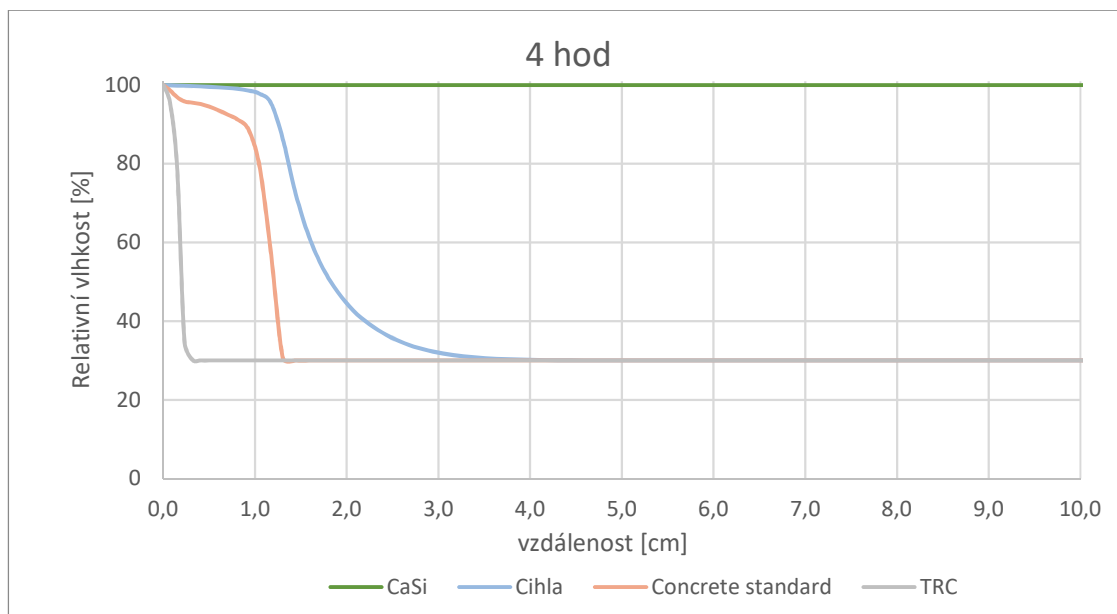
3.3. Návrh v programu WUFI Pro 6.0

První část výpočtů se týká pouze samotných materiálů a ne konstrukcí. Tyto výpočty budou sloužit k objasnění rozdílů v chování TRC a standardního betonu. Pro srovnání jsou první dva výpočty provedeny ještě na cihle pálené a kalcium silikátové desce. Další část výpočtů je zaměřena na stejné konstrukce, které byli počítány v programu TEPLLO 2010.

3.3.1. Styk s vodou

První pokus simuluje styk konstrukce s vodou. Pokus si můžeme představit, jako kdyby přišel přívalový déšť a na povrchu materiálu se vytvořila vrstva vody. Za stálé teploty (23 °C) je jedna strana materiálu tloušťky 30 cm vystavena vlhkosti 100 %, druhá strana vlhkosti 30 %. V nastavení výpočtu je zapnut kapilární transport a vypnuto skupenské teplo fázových změn. Součinitelé přestupů na povrchu jsou nulové. Časový krok výpočtu je 0,1 hodiny. Za nějaký čas by se měli zaplnit všechny póry, materiál by měl být plně nasycen. Předpoklad je, že TRC tohoto stavu nedosáhne nikdy, protože je nenasákavý. Standardní beton by takového stavu dosáhl za velmi dlouhé časové období. Cihla pálená by měla nasáknout vodu poněkud rychleji a CaSi během několika dní. Materiál CaSi je velmi nasákavý, je zde pro srovnání s TRC, které je téměř nenasákavé. Grafy ukazují jednotlivé materiály a postup vlhkosti do konstrukce v čase na prvních 10 cm vzorku.



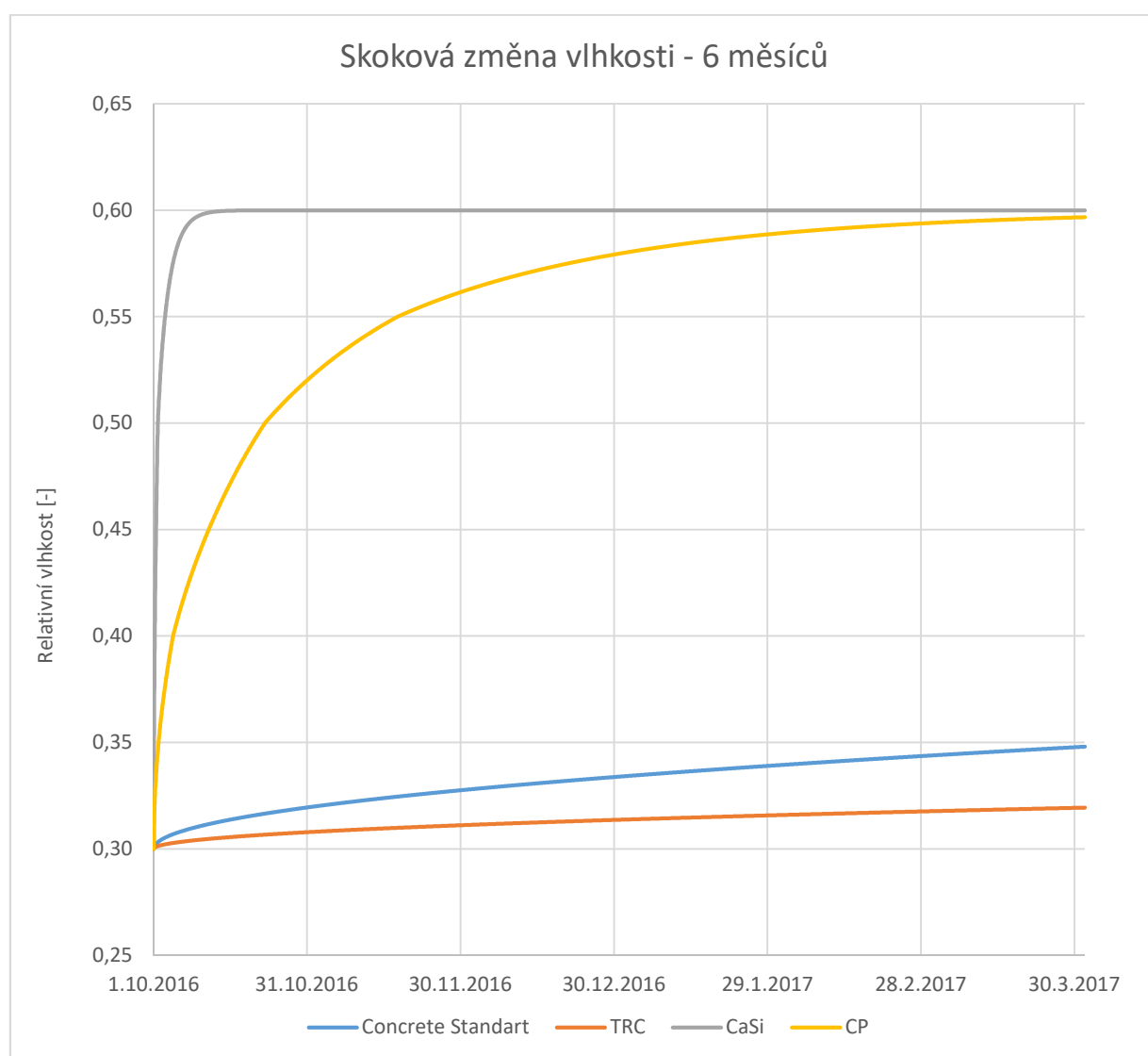


Obrázek 45: Grafy vlhkosti v materiálech po různých časových úsecích

Pokus dopadl podle předpokladu. Na prvním grafu můžeme vidět, jak kalcium silikát rychle transportuje vodu, po 30 minutách se vlhkost dostala až do 1/3 materiálu. Ostatní materiály se také chovají podle předpokladu. Po 16 hodinách je kalcium silikát plně nasycen. Cihla pálená a standardní beton mají podobné chování, chování betonu je však nelineární, za to může nejspíše nerovnoměrná velikost a rozmístění pórů. Po 30 minutách vlhkost dostala zhruba desetiny tloušťky vzorku. TRC také transportuje minimální množství vody, za tuto dobu však hranice vody dosáhla pouze 0,5 cm od povrchu. Těchto podmínek však nejspíš není možné dosáhnout. V roce 2015 na území Prahy nebyla většina dešťů delších než 6 hodin. Z tohoto pokusu plyne, že TRC může být použito jako ochranná část konstrukce a spolehlivě ji ochrání před deštěm, nepustí vodu dál do konstrukce. Na druhou stranu ale také nepustí moc vody z konstrukce, vlhká konstrukce bude velmi dlouho vysychat.

3.3.2. Skoková změna relativní vlhkosti

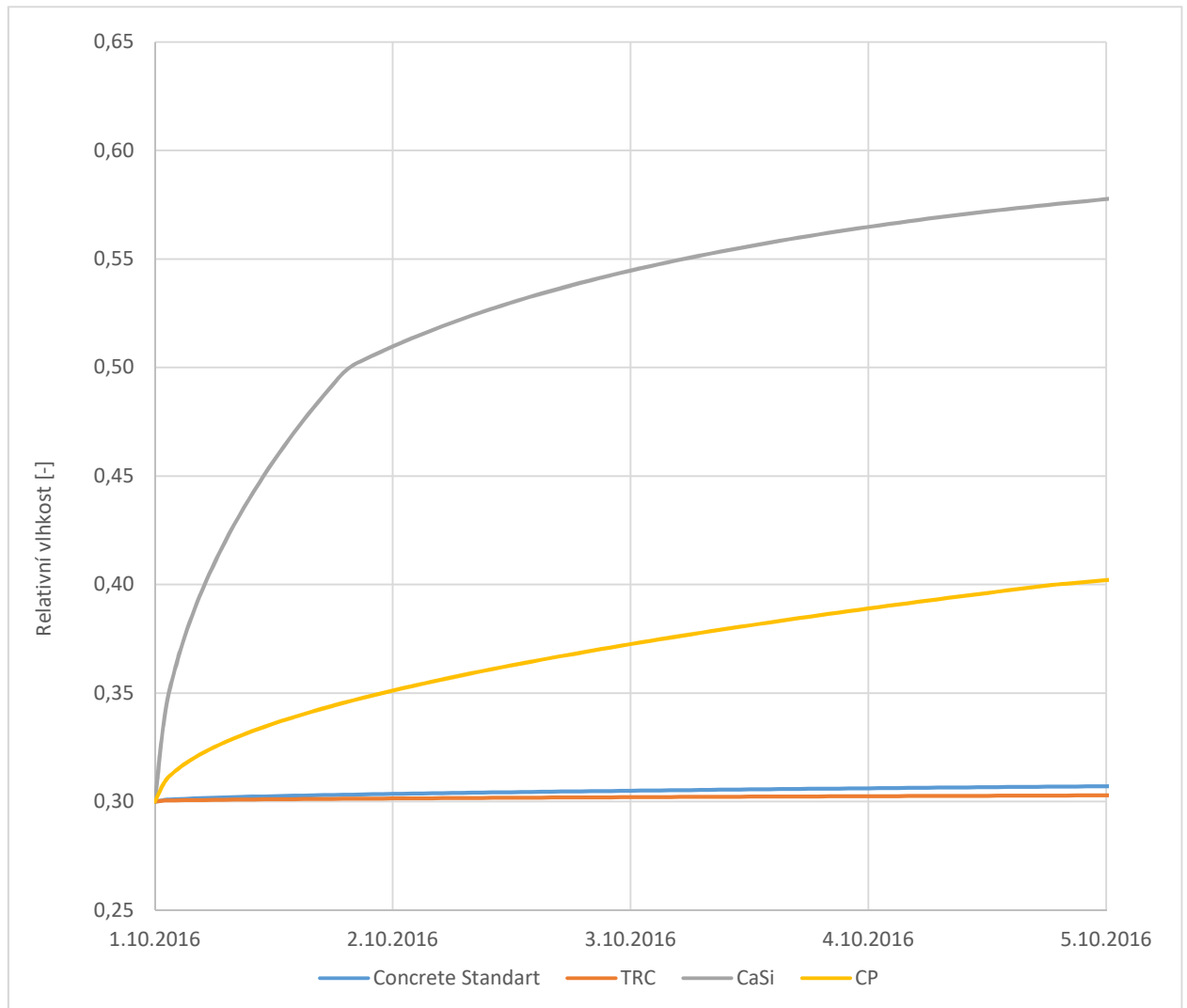
Druhý pokus simuluje skokovou změnu relativní vlhkosti. Nastavení výpočtu je stejné jako u prvního pokusu. Počáteční vlhkost je 30 % a teplota 23 °C. Na obou stranách vzorku tloušťky 30 cm se změnila vlhkost prostředí na 60 %, teplota však zůstává stejná. Pozorujeme difuzi vodní páry materiálem a postupné vyrovnávání vlhkosti s prostředím. V laboratoři by tento pokus probíhal tak, že bychom vzorky vzali z exikátoru s relativní vlhkostí 30 procent, dali je do exikátoru s relativní vlhkostí 60 % a měřili vlhkostní přírůstky. Výpočetní období je půl roku. Pokus je proveden opět na standardním betonu, TRC, CaSi a cihle pálené.



Obrázek 46: Graf skokové změny vlhkosti: půl roku

Na prvním grafu je zobrazena změna se relativní vlhkostí u všech čtyřech materiálů během půl roku. Je vidět, že relativní vlhkost standardního betonu se zvedla o pouhých 5 procent, TRC jen o 2 procenta. K vyrovnání vlhkosti standardního betonu s prostředím dojde během několika let, u TRC je to ještě mnohem déle. Může za to difuzní odpor, který má TRC ($\mu=540$) mnohem větší než standardní beton ($\mu=73$). Mezi těmito materiály však není tak velký rozdíl. Je to nejspíše z důvodu stejně zvolené sorpční křivky. Neznáme však skutečné sorpční vlastnosti těchto materiálů a jejich hygroskopického chování. Faktor difuzního odporu cihly pálené ($\mu=10$) je několikrát menší než v případě standardního betonu, za tuto dobu téměř vyrovnala vlhkost s prostředím. V případě CaSi toto vyrovnání proběhlo během několika prvních dní. Difuzní odpor tohoto materiálu je ještě menší než cihly pálené ($\mu=4$). Velký rozdíl mezi betonem a CaSi s cihlou pálenou je, mimo faktor difuzního odporu, také v kapacitě pro ukládání vody. CaSi

a CP mají velmi malou kapacitu, proto tak rychle mění svoji vlhkost, beton na druhou stranu má tuto kapacitu větší. Tato schopnost vychází ze sorpční křivky, která je pro tyto dvě skupiny zcela rozdílná (viz kapitola 3.1 Parametry materiálů).

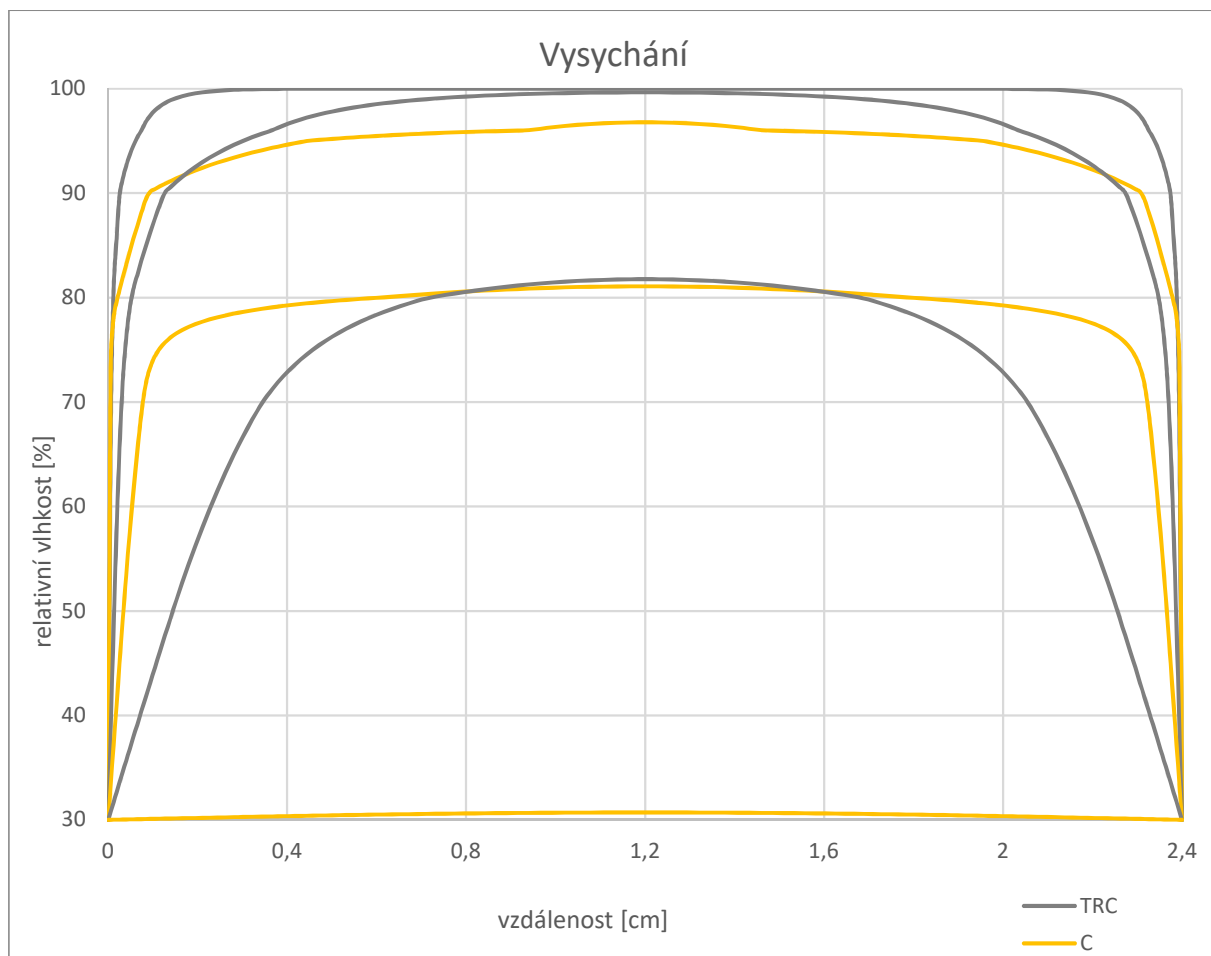


Obrázek 47: Graf- skoková změna vlhkosti během prvních pěti dní

Na druhém grafu je zobrazeno prvních pět dní výpočtu. Zlom v křivce CaSi je způsoben interpolací podle hodnot ze sorpční křivky při přepočtu vlhkosti na relativní vlhkost. Zde je vidět, že CaSi je opravdu velmi difuzně otevřené a velmi rychle reaguje na změny prostředí. Oproti tomu je změna relativní vlhkosti betonu téměř zanedbatelná. Z tohoto pokusu by mohlo vyplívat, že TRC nebude vhodné pro difuzně otevřené konstrukce, jelikož slouží jako bariéra pro vodní páru. Spíše se do difuzně uzavřené konstrukce a nebo do provětrávané fasády, jako ochranná vrstva.

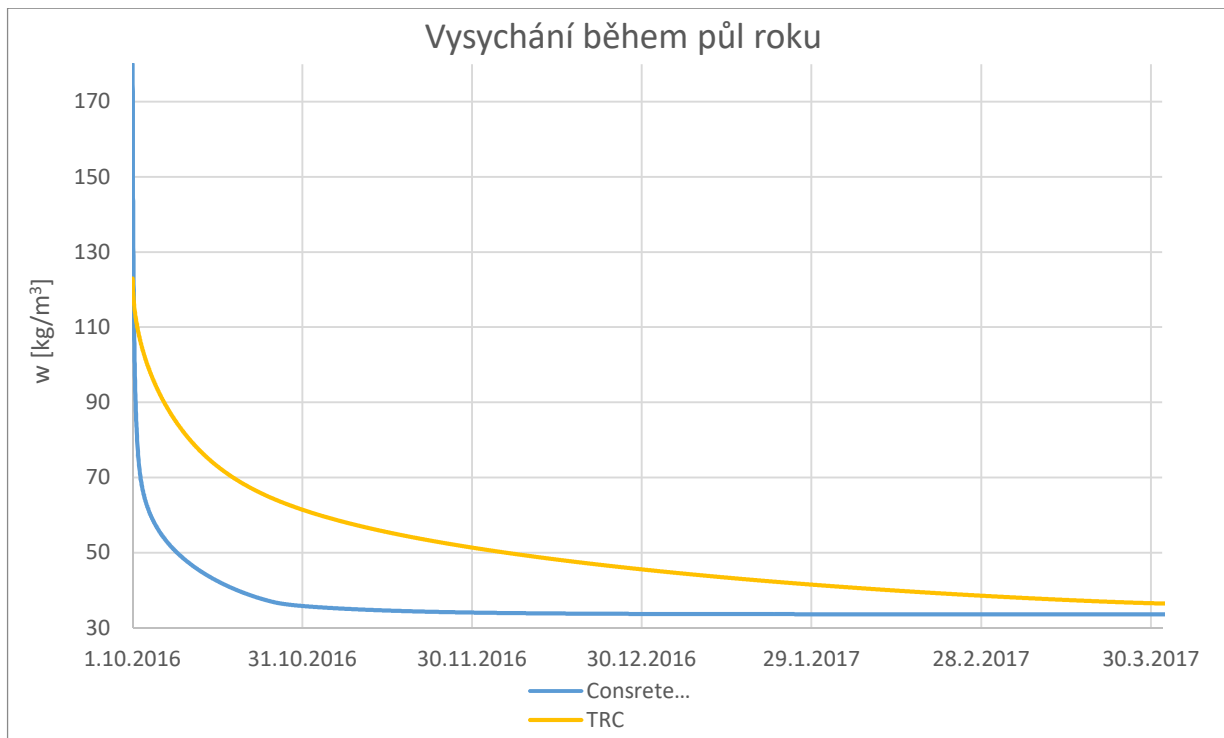
3.3.3. Vysychání

Třetí pokus zkoumá vysychání standardního betonu a TRC na vzorcích tloušťky 2,4 cm. Počáteční vlhkost materiálu je vlhkost při kapilárním nasycení, relativní vlhkost prostředí na pravé i levé straně je 30 %, vysychání je tedy oboustranné. To vše za stálé teploty 23 °C po obou stranách, jako by byl vzorek v laboratoři. Ekvivalentní difuzní tloušťka na povrchu je nastavena na 0. Kapilární transport je zapnut, ale skupenské teplo fázových změn je vypnuto, aby teplota zůstala konstantní v celém průřezu. V reálném pokusu bychom potřebovali vzorky nějakým způsobem dostat do stavu kapilárního nasycení (relativní vlhkost 100 %). Poté bychom vzorky ze stran oblepili butylovou páskou, aby vysychání bylo jednorozměrné a dali do prostředí s RH=30 %. Po časových intervalech bychom měřili úbytky hmotnosti a pozorovali bychom, jak vzorek vysychá.



Obrázek 48: Grafy vlhkosti standardního betonu a TRC

Na grafu je zobrazen standardní beton i TRC ve třech časech po začátku zkoušky. První křivka je stav po jedné hodině, druhá křivka po jednom dnu a poslední křivka po jednom měsíci. Křivky znázorňují aktuální relativní vlhkost v každém bodě vzorku. První křivka standardního betonu není hladká, vysychání je nelineární. Je to způsobeno nerovnoměrným rozmístěním a vysycháním pórů v materiálu. Standardní beton potřebuje o něco málo více času než jeden měsíc na to, aby celý vyschnul. TRC však nevyschne ani po jednom roce. Za jeho pomalé vysychání může nejspíše jeho velmi nízká kapilární nasákavost a vysoký difuzní odpor. Díky tomu trvá vlhkosti, která je uprostřed vzorku, velmi dlouho, než se dostane do okolního prostředí.

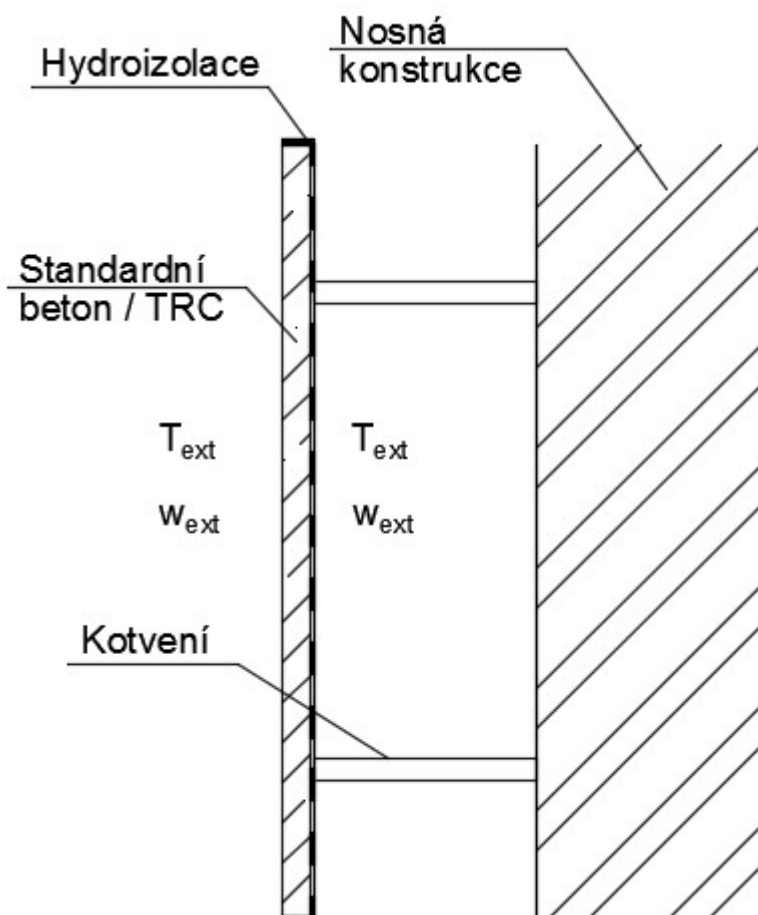


Obrázek 49: Graf vlhkosti standardního betonu a TRC v čase

Na tomto grafu je znázorněno vysychání v celém vzorku během půl roku. Každý z betonů má jinou vlhkost w_{cap} . Pro standardní beton je to 180 kg/m^3 a pro TRC 123 kg/m^3 . Při relativní vlhkosti 30 % mají oba betony vlhkost stejnou ($33,64 \text{ kg/m}^3$). Standardní beton této hodnoty dosáhl po zhruba měsíci a půl. TRC se však neustálilo ani za půl roku. Ze začátku je vysychání velmi rychlé, postupně se ale zpomaluje. Čím méně vlhkosti ve vzorku je, tím pomaleji se ze vzorku dostává. Obzvláště to platí pro vlhkost uprostřed vzorku. TRC po půl roce má vlhkost $36,5 \text{ kg/m}^3$, během dalšího půlroku tato vlhkost klesne na $34,2 \text{ kg/m}^3$. TRC se tedy ani po roce nedostalo do ustáleného stavu.

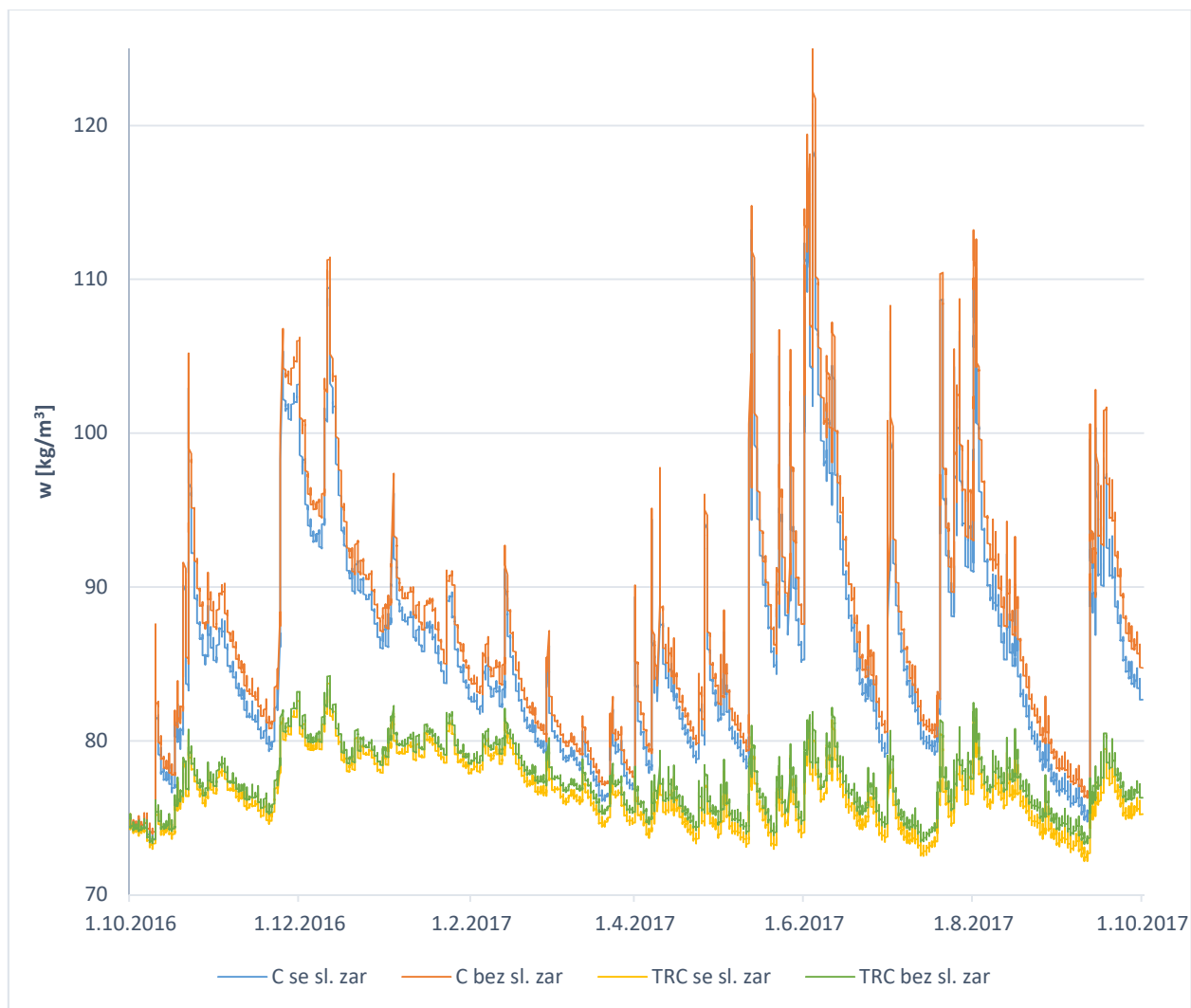
3.3.4. Větre hnaný déšť

Čtvrtý pokus simuluje větrem hnaný déšť na vzorcích z reálné konstrukce. Standardní beton je tedy panel tloušťky 60 mm a TRC panel tloušťky 24 mm. Ekvivalentní difuzní tloušťka je závislá na faktoru difuzního odporu a tloušťce materiálů. Standardní beton má ekvivalentní difuzní tloušťku 4,38 m, TRC má tuto tloušťku 12,96 m, to je zhruba třikrát více. Počáteční vlhkost materiálů je 80 %, to je v rovnováze s průměrnou relativní vlhkostí pro Prahu. Z vnitřní strany byla přidána hydroizolace (simulováno jako vysoká hodnota ekvivalentní difuzní tloušťky na vnitřním povrchu - 1000), na skutečnou konstrukci fouká také z jedné strany. U vnější strany byl zvolen odpor při přestupu tepla závislý na větru.



Obrázek 50: Schéma zkoušky, jak by probíhala ve skutečnosti

Na obou stranách konstrukce působí normální venkovní prostředí – klimatický soubor pro Prahu. Kapilární transport je zapnutý a skupenské teplo fázových změn je opět vypnuto. Výpočet probíhá ve dvou variantách. V první počítáme s vlivem slunečního záření a ve druhé ne. Výpočetní období je jeden rok. Pozorujeme, jak se během roku snižuje a zvyšuje vlhkost v konstrukci, v závislosti na srážkách a větru. Na grafu jsou vidět období, kdy se zvyšuje vlhkost po deštích a období snižování vlhkosti – období bez dešťů. Rozdíly mezi variantou bez slunečního záření a se slunečním zářením nejsou nikterak velké. Celá konstrukce však schne rychleji a celkově je sušší u varianty se slunečním zářením. Výkyvy vlhkosti u TRC nejsou tak znatelné jako u standardního betonu. Za to může nasákavost materiálů. TRC ji má řádově nižší, a proto tolik nereaguje na změny klimatu jako standardního betonu.



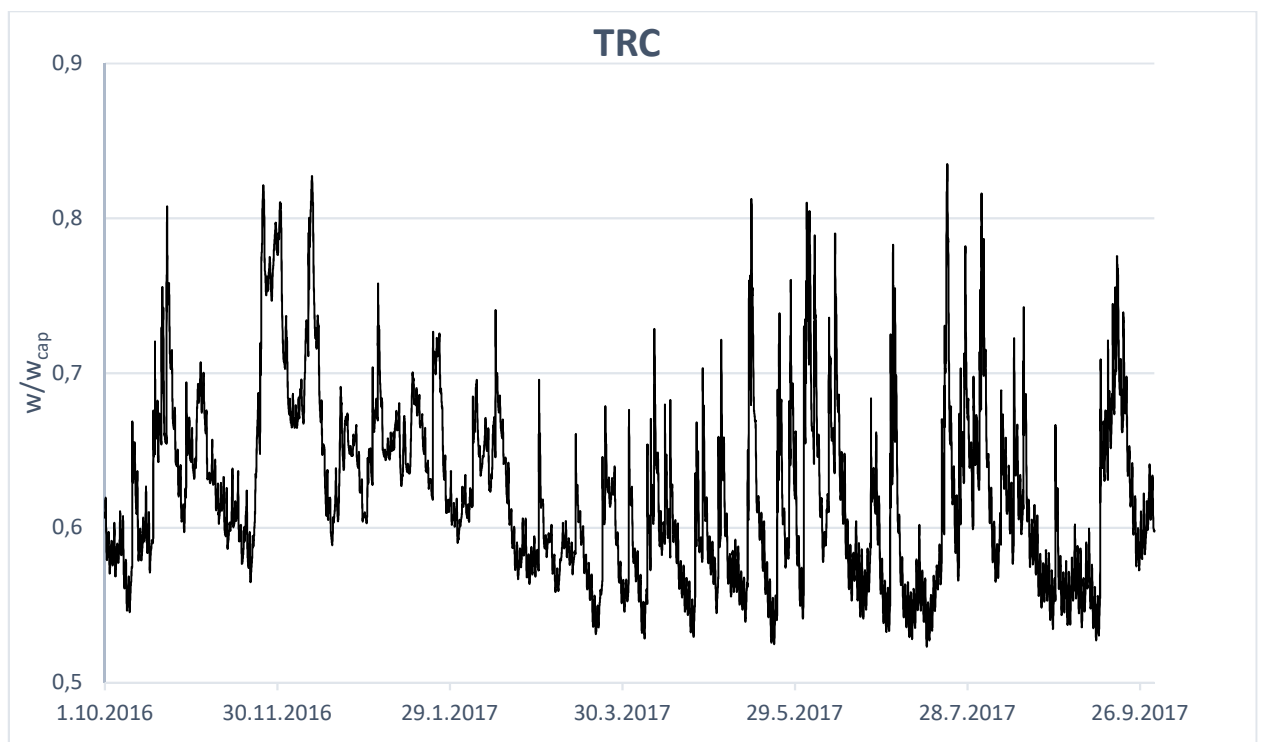
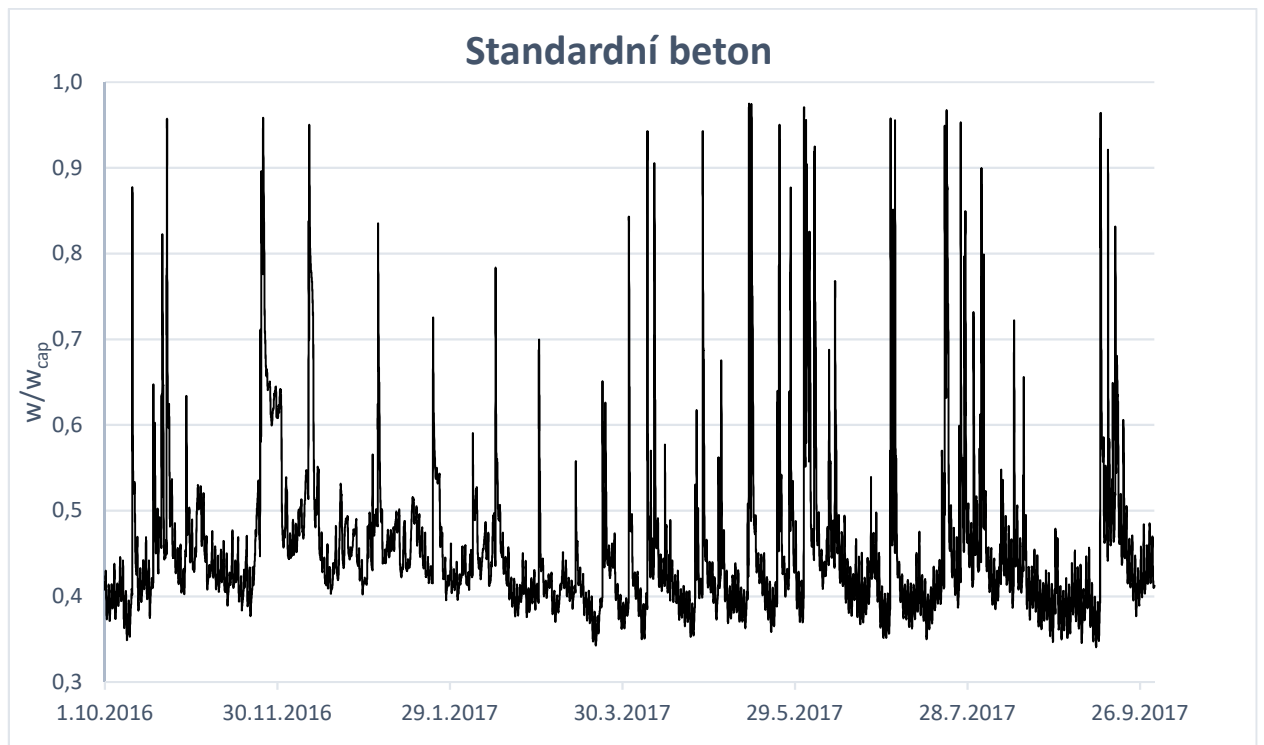
Obrázek 51: Graf vlhkosti v materiálech během roku

Jelikož je beton anorganický materiál, nehrozí poškození plísněmi a hnilobou při vyšších vlhkostech. Riziko tu však je při působení mrazu a vyšší vlhkosti zároveň. Mohlo by dojít k roztrhání konstrukce. Následující tabulka ukazuje přehled průměrných, minimálních a maximálních vlhkostí v různých variantách.

Vlhkost v materiálech	Concrete standard		TRC	
	se sl. zář.	bez sl. zář.	se sl. zář.	bez sl. zář.
Průměr [kg/m ³]	85,93	87,61	76,65	77,39
RH [-]	0,87	0,87	0,83	0,84
Min [kg/m ³]	73,25	73,94	72,18	73,28
RH [-]	0,77	0,78	0,75	0,77
Max [kg/m ³]	121,19	125,09	83,77	84,23
RH [-]	0,95	0,95	0,86	0,86

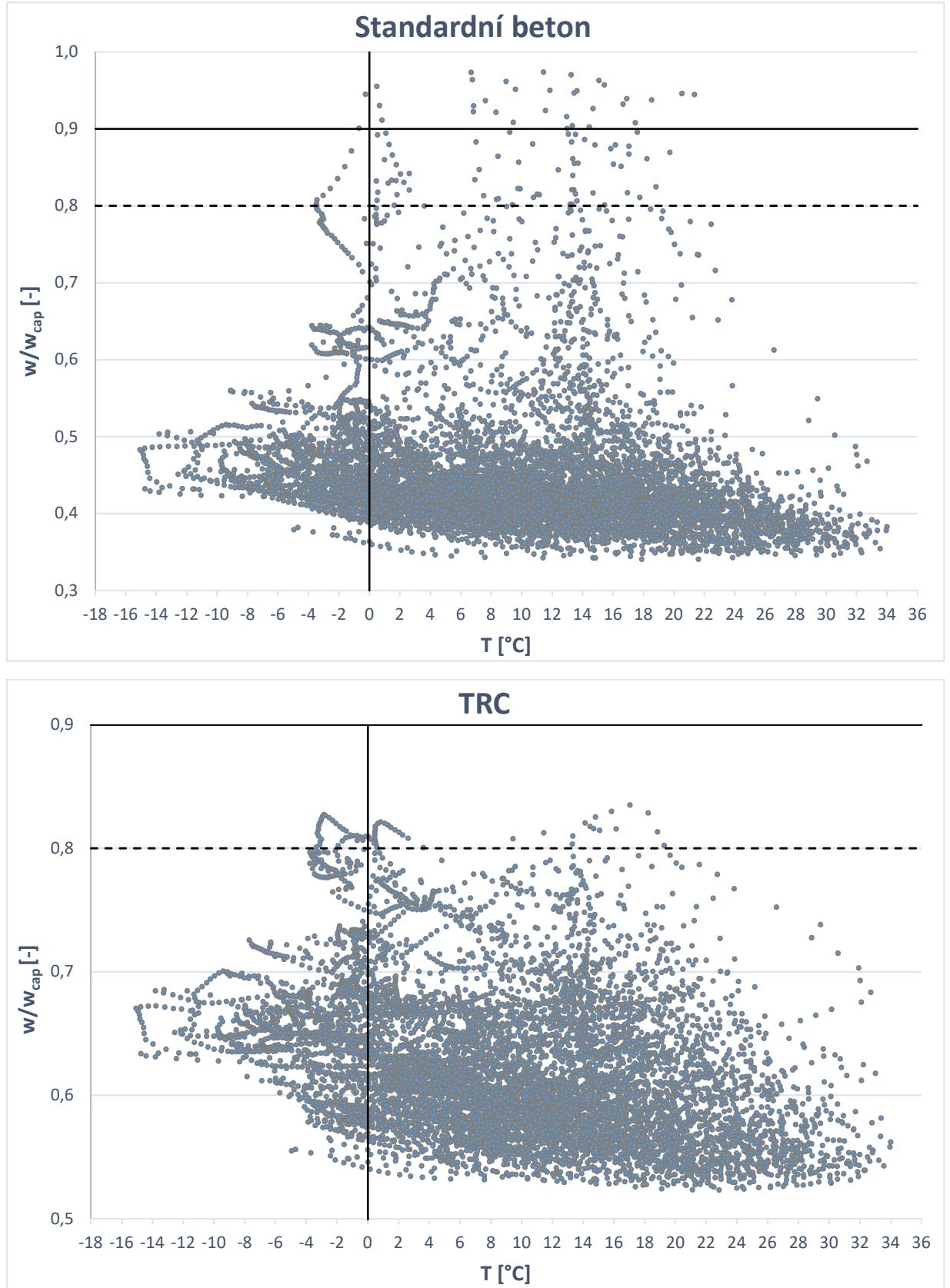
Tabulka 14: Průměrná, minimální a maximální vlhkost v materiálech

Potržení mrazem u betonu hrozí, když je stupeň kapilárního nasycení větší než 0,9. Stupeň kapilárního nasycení je podíl vlhkosti s vlhkostí v kapilárním nasycení. Tato úvaha má odůvodnění takové, že led má oproti vodě o 10 % větší objem, proto když zamrzne voda o objemu menším než 90 % pórů, nemělo by dojít k roztrhání betonu. Vlhkost v kapilárním nasycení je pro standardní beton 180 kg/m³ a pro TRC 123 kg/m³. Hodnoty v tabulce jsou průměrné hodnoty pro celou tloušťku vzorku. Nerizikovější je vrstva u vnějšího povrchu, proto byla konstrukce rozdělena na dvě vrstvy, na vnějším povrchu tloušťky 5 mm a na zbytek panelu. Na následujících grafech je vidět stupeň kapilárního nasycení v čase ve vrstvě u vnějšího povrchu.



Obrázek 52: Grafy stupně kapilárního nasycení v čase

TRC, na rozdíl od standardního betonu, vůbec nedosahuje hodnoty 0,9. Když ale zvolíme kritérium $w/w_{cap} > 0,8$, tak budeme na straně bezpečnosti. Zajímá nás ale, kdy bude mrznout a zároveň bude stupeň kapilárního nasycení větší než 0,9 (nebo 0,8). Další grafy ukazují, jak často tyto situace nastávají.



Obrázek 53: Grafy stupně kapilárního nasycení a teploty

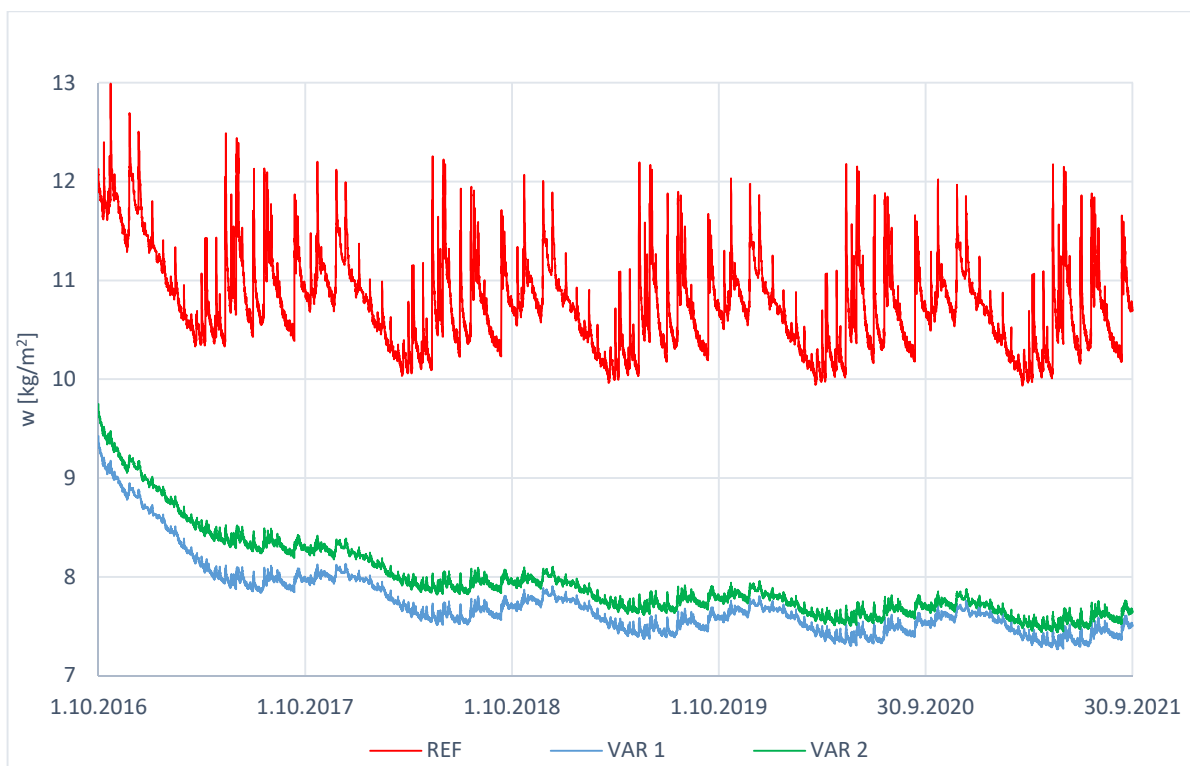
Průběh teplot je brán z monitorovacího bodu umístěného uprostřed vzorku. Standardní beton má pouze několik bodů, kdy je stupeň kapilárního nasycení větší než 0,8 a zároveň v něm mrzne. TRC však těchto bodů má více. Grafy ukazují podmínky, kde se počítá s vlivem slunečního záření. V následující tabulce je přehled, kolikrát a za jakých podmínek tyto situace nastávají. Je to celkový počet hodin během roku za předpokladu, že každý změřený bod trvá hodinu (výpočetní krok je 1 hodina).

Počet hodin kdy je $T < 0^{\circ}\text{C}$ a zároveň $w/w_{\text{cap}} >$ než:							
0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8
CON bez Sl. zář.		CON se Sl. zář.		TRC bez Sl. zář.		TRC se Sl. zář.	
2	11	2	10	0	42	0	30

Tabulka 15: Přehled hodin, kdy hrozí ohrožení konstrukce mrazem

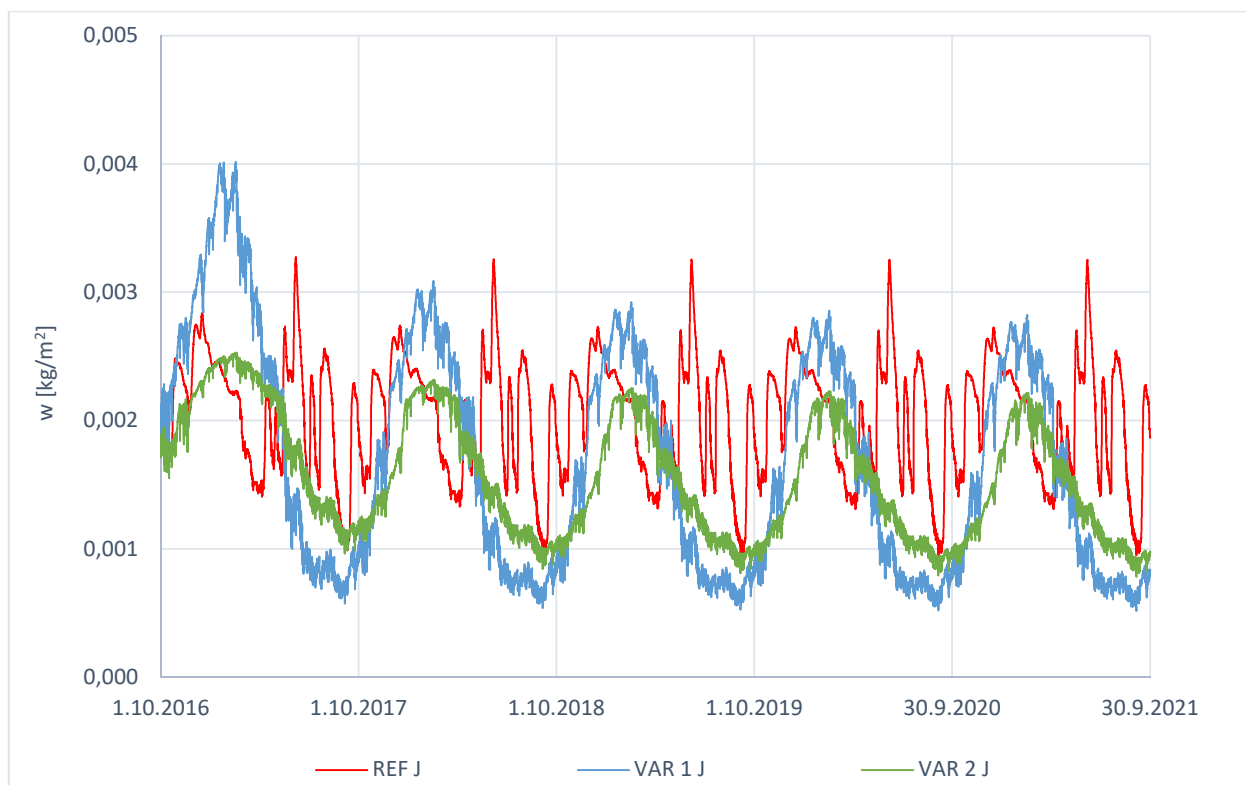
3.3.5. Reálné konstrukce v reálných podmínkách

Tato část se zabývá konstrukcemi, které byly modelovány v programu Teplo. Jedná se o referenční variantu složenou ze standardního betonu tloušťky 100 mm, izolace z EPS tloušťky 60 mm a ochranné vrstvy tloušťky 60 mm ze standardního betonu. Varianta 1 modifikuje referenční variantu. Má místo standardního betonu na vnější straně panel z TRC tloušťky 24 mm. Varianta 2 je více zateplená varianta 1 s EPS tloušťky 240 mm. V programu Wufi lze nastavit různé možnosti výpočtu a chování konstrukce. Venkovní klima je z klimatického souboru pro Prahu. Vnitřní klima je nastaveno pro vysoké zatížení vlhkostí. Vlastnosti výpočtu byly nastaveny pro co nejrealističtější chování a zároveň tak, aby konstrukce byly vystaveny největší možné zátěži. Tedy konstrukce je z jižní strany, kde nejvíce svítí sluníčko. Zatížení větrem a deštěm je vysoké, pro budovy větší 20 m, kde nejvíce fouká. Byla nastavena redukce dešťové vody 0,7. To znamená, že 30 % vody, která dopadne na povrch, se odrazí pryč a 70 % vody zůstane na povrchu. Dále byla nastavena absorpce krátkovlnného záření 0,65 odpovídající šedé barvě betonu. Počáteční vlhkost v materiálech je opět 80 %, který odpovídají ročnímu průměru relativní vlhkosti pro Prahu. Výpočetní období je pět let s časovým krokem 1 hodina.



Obrázek 54: Graf průběhu vlhkosti v reálných konstrukcích

Graf ukazuje vlhkost v každé konstrukci, je to však vlhkost na metr čtvereční skladby. Je vidět, že standardní beton, sloužící jako ochranná vrstva v referenční variantě, daleko víc reaguje na změny počasí. Je to tím, že má podstatně menší difuzní odpor a nasákavost než TRC. Rozdíl v průměrné vlhkosti je tu velký proto, že panel každá skladba je jiná a do každé skladby se vejde jiné množství vlhkosti. Nedá se tedy říct, jestli je něco špatně, nebo zda někde kondenzuje vodní pára. Z tohoto hlediska nás zajímá místo, kde by mohla kondenzace nastat. Z programu teplo říká, že toto místo je na rozhraní izolace a vnějšího panelu. Podle návodu na serveru wufi-forum.com vycházejícího z německé normy DIN 4108-3, který říká, že kondenzát může vznikat na plochách mezi dvěma materiály. Snadný způsob, jak získat množství vody pro tuto oblast, je rozdělit materiál (izolace) na dvě části. Jednu u povrchu rozhraní – kontrolní vrstva, která má tloušťku 1-5 mm a na zbytek. Další krok je vyexportovat množství vlhkosti v této malé vrstvě a vyjádřit ho v kg/m^2 . Celkové množství nesmí překročit 1 kg/m^2 a $0,5 \text{ kg/m}^2$ pro kapilárně neaktivní materiály (míněno maximální rozdíl vlhkostí). Česká norma ČSN EN ISO 13788 vychází z Glaserovy metody a limit zkondenzované vody je $0,1 \text{ kg/m}^2$, to je 5x až 10x méně než v Německu. Na následujících grafech je vidět průběh vlhkosti ve vrstvě EPS tloušťky 1 mm na rozhraní EPS a ochranného betonu (16).

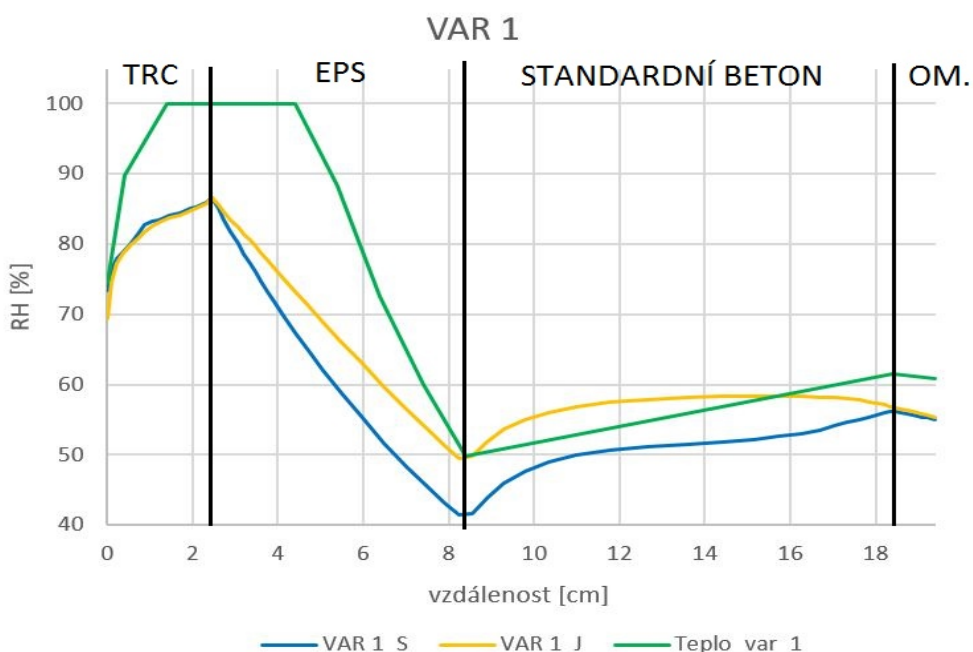
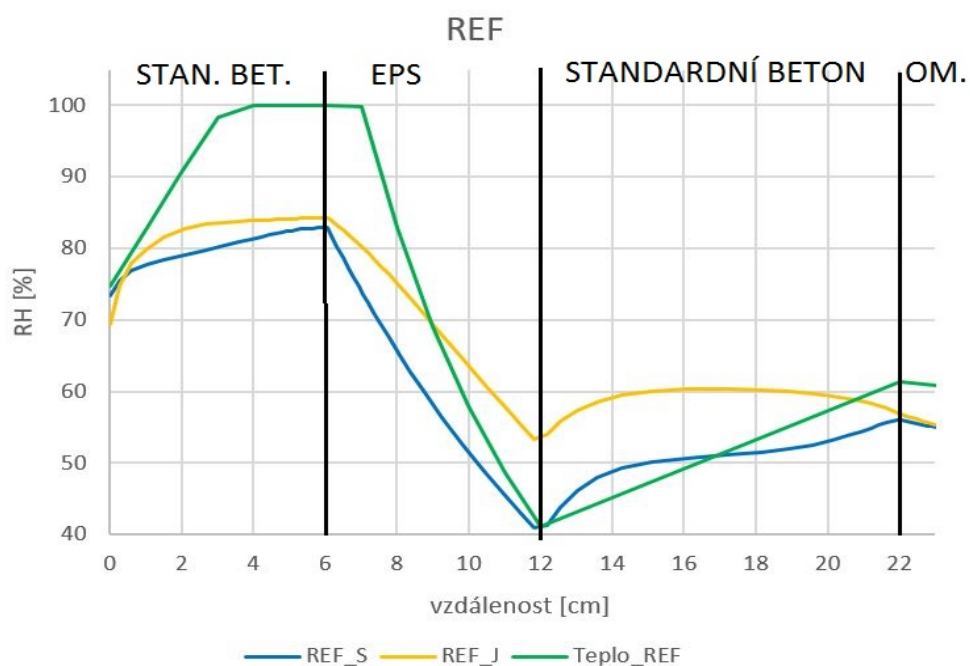


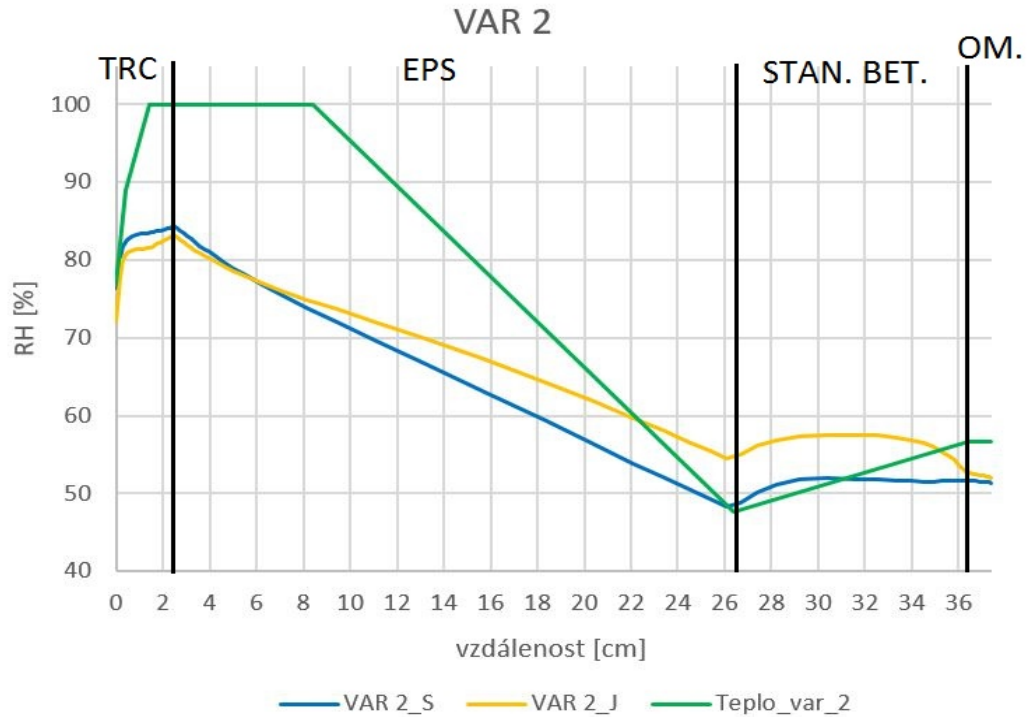
Obrázek 55: Graf vlhkosti v kontrolní vrstvě EPS

Je vidět, že v kontrolní vrstvě není ani zdaleka tolik zkondenzované vody, kolik je maximální povolené množství. Například Varianta 1 má maximum $0,004 \text{ kg/m}^2$ a minimum $0,0006 \text{ kg/m}^2$, to je $0,0036 \text{ kg/m}^2$ zkondenzované vlhkosti během prvního roku výpočtu, což je značně pod limitem. Zároveň můžeme pozorovat, že po ustálení se vlhkost ani v jedné variantě dlouhodobě nezvyšuje.

3.4. Porovnání Wufi a Tepla

Rozdílů mezi výpočtem v Teple a ve Wufi je několik. První je ten, že teplo nezahrnuje do svých výpočtů vliv slunečního záření a srážek. Dalším podstatným rozdílem je, že teplo nepočítá se sorpční kapacitou materiálů. Není zde žádný prostor k ukládání vlhkosti. Dochází tedy daleko dříve ke kondenzaci vlhkosti (RH 100 %). Pro obdobný výpočet jako byl proveden v Teple jde udělat i ve Wufi, musí však být jinak nastaveno. Konstrukce je orientovaná na sever, odkud nejméně svítí a také méně fouká. Absorpce krátkovlnného záření je nastavena na 0, tím vynecháváme sluneční záření. Vypnutí deště bylo pomocí faktoru redukce dešťové vody, který byl nastaven taky na 0. Jinak je výpočet stejný jako v předchozí kapitole. Export byl proveden pro leden poslední rok výpočtu (2021). Z průměrných hodnot relativních vlhkostí v konstrukcích byli vytvořeny grafy a podmínky na hranici byli dosazeny do programu teplo. Pomocí skutečného tlaku a saturovaného tlaku byl vytvořen průběh relativní vlhkosti v konstrukci.





Obrázek 56: Grafy vlhkosti v konstrukcích z Tepla a Wufi

Na grafech jsou zobrazeny průběhy relativní vlhkosti z programu Teplo a Wufi. Wufi tu má průběh s vlivem deště a srážek (J) i průběh bez těchto vlivů (S). Ve všech třech variantách dochází v programu teplo ke kondenzaci. Wufi však má reálnější průběh a počítá s tím, že nějakou vlhkost pojme samotný materiál, než dojde ke kondenzaci. Maximální vlhkost je kolem 85 %, takže tu je ještě dostatek místa, než se vlhkost dostane na w_{cap} .

4. Závěr

Tato práce se nejprve zabývá betonováním vzorků, které jsou předmětem laboratorního zkoumání. Pro součinitel tepelné vodivosti byly vyrobeny vzorky 300x300x60 mm, vždy tři pro každý materiál (standardní beton, vysokohodnotný beton a vysokohodnotný beton s textilní výztuží). Pro zkoušku difuzního odporu bylo vyrobeno celkem 8 kulatých vzorků (4 standardního betonu a 4 HPC) s průměrem 115 mm a výškou 25 mm. Trámky 160x40x40 mm byly vyrobeny pro zkoušku kapilární nasákavosti a to 6 ze standardního betonu a 6 z HPC. Nejdříve bylo provedeno měření a vážení vzorků pro výpočet objemové hmotnosti. Průměrná hodnota pro standardní beton je 2130 kg/m³ a pro TRC 2280 kg/m³. Následně bylo provedeno měření součinitele tepelné vodivosti pomocí přístroje ISOMET 2104 s plošnou sondou. Po zprůměrování hodnot vychází 2,165 W/mK u standardního betonu a 2,202 W/mK u TRC. Další zkouška byla zaměřena na faktor difuzního odporu metodou misek. Nejprve byla zkouška provedena za nízké relativní vlhkosti (37 %). Výsledek pro standardní beton je 140 a pro TRC 869. Poté byla vlhkost přehozena na 79 %, zkouška proběhla za vysoké relativní vlhkosti s výsledkem 73 pro standardní beton a 540 pro TRC. Poslední zkouška v laboratoři byla zaměřena na nasákavost. Výsledkem této zkoušky je hmotnostní nasákavost standardního betonu 1,72 % a TRC 0,04 %. Dále součinitel absorpce vody, který byl odhadnut pouze řádově. Standardní beton má součinitel absorpce vody 0,02 kg/m²s^{0,5} a TRC 0,001 kg/m²s^{0,5}.

Druhá část diplomové práce je zaměřena na simulaci materiálů ve výpočetních programech a na objasnění jejich chování. Nejprve je proveden návrh třech skladeb v programu Teplo 2010. Referenční varianta vychází z panelového domu, kde je nosná část standardní beton tloušťky 100 mm, izolace z EPS tloušťky 60 mm a ochranná vrstva 60 mm standardního betonu. Varianta 1 používá jako ochrannou vrstvu panel z TRC tloušťky 24 mm. Varianta 2 má ještě navíc izolaci, celkem je zde 240 mm izolace z EPS. Výsledkem simulace je množství zkondenzované vody, vypařitelné vody a akumulace v konstrukci. Referenční varianta funguje dobře, ale nesplňuje požadavky norem na prostup tepla a na množství zkondenzované vodní páry. U varianty 1 dochází ke kondenzaci a ukládání vlhkosti v konstrukci během let. Pouze varianta 2 splňuje požadavky norem. Ke kondenzaci sice dochází, ale během roku stihne kondenzát vyschnout.

Ostatní pokusy byli modelováni v programu Wufi pro 6.0. Nejprve jsou zde jednoduché příklady se samotnými materiály, pro objasnění rozdílů v chování standardního betonu a TRC. Prvním takovým pokusem je styk s vodou neboli simulace přívalového deště. TRC spolehlivě dokáže ochránit konstrukci, ale většina vody stéká po fasádě dolů a celá konstrukce je tedy náročnější na detaily. Další pokus je zaměřen na skokovou změnu vlhkosti. Z původních 30 % byla změněna relativní vlhkost na 60 %. TRC díky vysokému faktoru difuzního odporu vyrovnává vlhkost s prostředím velmi dlouho. Třetí pokus simuluje vysychání materiálu. Vzorky tloušťky 24 mm se 100 % relativní vlhkostí byly dány do prostředí s 30 % vlhkostí. Standardní beton vyschne do dvou měsíců, TRC však nevyschne ani do 1 roku. Poslední pokus ukazuje chování ochranných betonových panelů (standardní beton tloušťky 60 mm a TRC 24 mm) během celého roku v reálných podmínkách pro Prahu a ukazuje, jak materiál reaguje na větrem hnaný déšť. TRC díky nízké nasákavosti reaguje na prostředí daleko méně než standardní beton. Nicméně nějakou vlhkost nasaje, ale během roku nenastává žádná situace, kdy je v konstrukci vysoká vlhkost (90 % a více) a zároveň mrzne. Nehrozí tedy roztrhání konstrukce mrazem. Poslední příklad zkoumá skladby, které byly simulovány ve výpočtu v Teple 2010. Wufi však počítá s vlivem deště, slunečního záření, sorpční kapacity materiálu a dalšími vlastnostmi, které Teplo nebere v úvahu. Z této zkoušky plyne, že ve všech třech variantách nedochází k dlouhodobému zvyšování vlhkosti. V kontrolní vrstvě EPS tloušťky 1 mm u rozhraní s ochranným panelem z betonu nedochází k nadměrné kondenzaci vlhkosti.

Poslední kapitola výpočtové části porovnává výsledky z Tepla a Wufi. Ve Wufi byl vypnut vliv deště a slunečního záření, byl vytvořen průběh vlhkosti konstrukcí v průměru za nejchladnější měsíc – leden. Podobný průběh byl vytvořen i z programu Teplo. Z porovnání plyne, že výpočet ve Wufi je složitější a pravděpodobně i přesnější. Program stále počítá se sorpční kapacitou materiálu, kterou Teplo vynechává.

Všechny tyto pokusy byly vytvořeny k ověření, zda se TRC panel dá využít v konstrukcích pozemních staveb. Použít se dají určitě, ale jako nosná konstrukce vyjde TRC velmi neekonomicky. Proto bylo TRC v návrzích uvažováno pouze jako ochranná vrstva izolace. Jelikož je TRC v podstatě parozábrana, není vhodné do difuzně otevřených konstrukcí. Vhodné je tedy pro difuzně uzavřené konstrukce nebo pro provětrávané fasády, jako vnější vrstva. Při dobrém návrhu může v konstrukci dobře fungovat, ale musí se dát pozor na několik věcí. Důležitá je minimalizace kondenzace vodní páry. Další krizová místa jsou na styku panelů, jejich kotvení a další detaily jako parapety, okenní a dveřní otvory a také sokl, po kterém bude stékat většina vody při dešti, protože TRC do sebe pustí jen minimální množství.

Námětem pro další práci by určitě mohlo být naměření sorpční křivky. Pomohlo by totiž ve všech výpočtech znát přesné chování materiálu za daných vlhkostí. Dalším příkladem k pokračování by mohl být návrh jiných konstrukcí k doplnění skladeb, které byly zkoumány v této práci (například použití TRC panelu jako externí ochranné vrstvy difuzně uzavřené dřevostavby). Zajímavé by také jistě byly návrhy některých fasádních prvků z TRC (například parapetu, který by sloužil jako doplněk fasády z TRC).

Bibliografie

1. Textilní beton. *Wikipedie - Otevřená encyklopeide*. [Online] Wikimedia project, 2008. https://cs.wikipedia.org/wiki/Textil%C3%AD_beton.
2. Laiblová, L., Vlach, T., Ženíšek, M. VYUŽITÍ TECHNICKÝCH TEXTILÍ JAKO ALTERNATIVNÍ VÝZTUŽE DO SUBTILNÍCH FASÁDNÍCH PANELŮ Z VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU. *UCEEB*. [Online] 15.. Říjen 2015. http://www.uceeb.cz/system/files/souboryredakce/laiblova_vyuziti_technickych_textilii.pdf.
3. Caldarone, Michael A. *High.Strength Concrete A practical guide*. Abingdon : Taylor and Francis, 2009. 978-0-415-40432-7.
4. J. Toman, R. Černý. Thermal Conductivity of High Performance Concrete in Wide Temperature and Moisture Ranges. *CTU Open Journal Systems*. [Online] 2001. <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/174/6>.
5. Difúze vodní páry - veličiny, hodnoty a jednotky. *STAVEBNICTVI3000*. [Online] Vega společnost s ručením omezeným, 18. Prosinec 2010. <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/difuze-vodni-pary-veliciny-hodnoty-a-jednotky/>.
6. Kumaran, M. Kumar. *IEA Annex 24 Task 3 Catalogue*.
7. Doc. Ing. František Mrlík, DrSc. *Vlhkostné problémy stavebných materiálů a konstrukcí*. Bratislava : Alfa, 1985.
8. Nasákavost. *WIKIPEDIE Otevřená encyklopedie*. [Online] WIKIMEDIA project, 17. Únor 2014. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nas%C3%A1kavost>.
9. Fehling, E., Schmidt, M., Sturwald, S. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. Kassel : kassel university press, 2008. 978-3-89958-376-2.
10. Typ HFM Heat Flow Meter tepelná vodivost / prostup tepla / tepelný tok. *RMI*. [Online] eBRÁNA s.r.o. , 2016. <http://www.rmi.cz/typ-hfm-heat-flow-meter-hfm>.
11. Richter, Ing. Jan. Difuzní vlastnosti stavebních materiálů – stanovení nejistot při měření v laboratoři stavební tepelné techniky, RP1. *Difuzní vlastnosti stavebních materiálů* . Praha : UCEEB ČVUT v Praze, 2015.
12. Otto, J., kolektiv. *Ottův slovník naučný - komplet*. Praha : Argo, 2003. 80-7185-057-8.
13. Kopecný, Pavel. Materiál a konstrukce - Šíření tepla, vzduchu a vlhkosti v budovách a stavebních prvcích . *Katedra technických zařízení budov K11125*. [Online] 2014. http://tzb2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/124mtib_kopecny.pdf.
14. Čechová, Ing.arch.Pavla. SOUSTAVY PANELOVÝCH DOMŮ. [Online] 12 2011.
15. Svoboda, Zbyněk. Difúze vodní páry a její kondenzace uvnitř konstrukcí. *Katedra pozemních staveb ČVUT*. [Online] 2014.
16. IBP, WUFI SupportTeam. kg/m² criteria. *Wufi-forum*. [Online] Wufi, 2014.

Seznam Obrázků

Obrázek 1: Tepelná vodivost v závislosti na vlhkosti pro HPC z Penly a pro HPC z Temelína (různé druhy značek odpovídají různým vzorkům)	7
Obrázek 2: Graf - faktor difuzního odporu podle katalogu IEA (6).....	8
Obrázek 3: Difuzní odpor, beton W/C=0,4.....	9
Obrázek 4: Difuzní odpor, beton W/C=0,7.....	9
Obrázek 5: Graf z hodnot programu Match	10
Obrázek 6: Součinitel absorpce vody (28 dní staré vzorky)	11
Obrázek 7: Vážení surovin HPC	12
Obrázek 8: Betonáž HPC.....	13
Obrázek 9: Míchačka M 180.....	14
Obrázek 10: Betonáž TRC	14
Obrázek 11: Forma na vzorek pro zkoušku difuzního odporu	15
Obrázek 12: Stavební míchačka	15
Obrázek 13: Betonáž běžného betonu	16
Obrázek 14: Popis vzorků	16
Obrázek 15: Graf objemové hmotnosti (HPC, TRC a C jsou pro λ , DHPC a DC pro μ a KHPC a KC pro zkoušku nasákavosti).....	19
Obrázek 16: Povrch jednoho z vzorků KC.....	19
Obrázek 17: Měření rozměrů mechanickým posuvným měřítkem.....	20
Obrázek 18: Princip deskového přístroje HFM 300.....	21
Obrázek 19: Měření součinitele tepelné vodivosti	21
Obrázek 20: Graf součinitelů tepelné vodivosti	22
Obrázek 21: Vzorek a miska na zkoušku faktoru difuzního odporu	23
Obrázek 22: Vzorek připravený na zkoušku	23
Obrázek 23: Schéma zkoušky při nízké relativní vlhkosti	24
Obrázek 24: Exikátor	24
Obrázek 25: Grafy sklonů hmotnostních úbytků.....	26
Obrázek 26: Kontrola vlhkosti v misce	26
Obrázek 27: Schéma zkoušky při vysoké relativní vlhkosti	28
Obrázek 28: Grafy sklonů hmotnostních příbytků	29
Obrázek 29: Graf předpokládaného průběhu faktoru difuzního odporu u standardního betonu.....	30
Obrázek 30: Graf předpokládaného průběhu faktoru difuzního odporu u HPC.....	30
Obrázek 31: Zkouška kapilární vzlínivosti.....	31
Obrázek 32: Graf nasákavosti omítky, betonu a HPC.....	32
Obrázek 33: Graf nasákavosti betonu a HPC.....	32
Obrázek 34: Zkouška kapilární vzlínivosti u vzorků oblepených butylovou páskou.....	33
Obrázek 35: Graf nasákavosti HPC a betonu.....	33
Obrázek 36: Rozdíl mezi první zkouškou a druhou	34
Obrázek 37: Sorpční křivka standardního betonu a TRC.....	35
Obrázek 38: Sorpční křivka cihly pálené a CaSi	36
Obrázek 39: Součinitel transportu kapalné vlhkosti, sání a redistribuce pro standardní beton a TRC.	37
Obrázek 40: Skladba panelového domu T06B ze soustavy TOX	38
Obrázek 41: Tlak vodní páry v konstrukci, varianta REF.....	39
Obrázek 42: Tlak vodní páry v konstrukci, varianta 1	40
Obrázek 43: Tlak vodní páry v konstrukci, varianta 2	40
Obrázek 44: Graf vlhkosti v konstrukcích.....	41

Obrázek 45: Grafy vlhkosti v materiálech po různých časových úsecích	43
Obrázek 46: Graf skokové změny vlhkosti: půl roku	44
Obrázek 47: Graf- skoková změna vlhkosti během prvních pěti dní.....	45
Obrázek 48: Grafy vlhkosti standardního betonu a TRC	46
Obrázek 49: Graf vlhkosti standardního betonu a TRC v čase	47
Obrázek 50: Schéma zkoušky, jak by probíhala ve skutečnosti	48
Obrázek 51: Graf vlhkosti v materiálech během roku.....	49
Obrázek 52: Grafy stupně kapilárního nasycení v čase	50
Obrázek 53: Grafy stupně kapilárního nasycení a teploty	51
Obrázek 54: Graf průběhu vlhkosti v reálných konstrukcích	52
Obrázek 55: Graf vlhkosti v kontrolní vrstvě EPS	53
Obrázek 56: Grafy vlhkosti v konstrukcích z Tepla a Wufi	55

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty z publikace Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí z roku 1985	10
Tabulka 2: Suroviny HPC.....	12
Tabulka 3: Suroviny běžného betonu	15
Tabulka 4: Hmotnosti vzorků	17
Tabulka 5: Rozměry a objemová hmotnost vzorků (HPC, TRC a C jsou pro λ , DHPC a DC pro μ a KHPC a KC pro zkoušku nasákavosti)	18
Tabulka 6: Výsledky z Isometu v červnu a v říjnu	22
Tabulka 7: Navážené hmotnosti vzorků	25
Tabulka 8: Přehled výsledků faktoru difuzního odporu při nižší průměrné relativní vlhkosti	27
Tabulka 9: Navážené hmotnosti vzorků	28
Tabulka 10: Přehled výsledků faktoru difuzního odporu při vyšší průměrné relativní vlhkosti.....	29
Tabulka 11: Souhrn výsledků faktoru difuzního odporu.....	30
Tabulka 12: Relativní vlhkost a vlhkost standardního betonu a TRC	35
Tabulka 13: Výsledky dle ČSN 730540.....	39
Tabulka 14: Průměrná, minimální a maximální vlhkost v materiálech	49
Tabulka 15: Přehled hodin, kdy hrozí ohrožení konstrukce mrazem	52

Elektronické přílohy

01. Rozměry, hmotnost, ρ , λ
02. Difuze
03. Nasákavost
04. Výpočet Teplo
05. Wufi – Styk s vodou
06. Wufi – Skoková změna vlhkosti
07. Wufi – Vysychání
08. Wufi – Větrem hnaný déšť
09. Wufi – Reálné konstrukce
10. Wufi – KCE kontrolní vrstva
11. Wufi vs Teplo
12. Nejistoty při měření difuzivity stavebních materiálů_lab STT_KS