



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI V BETONU
VYSTAVENÉM VYSOKÝM TEPLOTÁM**

METHODS OF MOISTURE MEASUREMENT IN CONCRETE EXPOSED TO
HIGH TEMPERATURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

STUDIJNÍ PROGRAM

STUDY PROGRAM

STUDIJNÍ OBOR

BRANCHES OF STUDY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

CIVIL ENGINEERING

INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB

INTEGRAL SAFETY OF CONSTRUCTIONS

Bc. Daniel Rajman

Ing. Radek Štefan, Ph.D.

PRAHA, 2018

Zadání:



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rajman Jméno: Daniel Osobní číslo: 423668

Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Metody měření vlhkosti v betonu vystaveném vysokým teplotám

Název diplomové práce anglicky: Methods of Moisture Measurement in Concrete Exposed to High Temperatures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.

Návrh a provedení experimentu.

Vyhodnocení experimentu.

Závěr.

Seznam doporučené literatury:

VAN DER HEIJDEN, G.H.A., H.P. HUIJINK, L. PEI a K. KOPINGA. One-dimensional scanning of moisture in heated porous building materials with NMR. Journal of Magnetic Resonance. 2011

QUINCOT, Gonzalo, Miguel AZENHA, Joaquim BARROS a Rui FARIA. Methods to measure moisture in concrete. Guimarães, 2011. FCT.

BAŽANT Z. P., THONGUTAI W., 1978, Pore pressure and drying of concrete at high temperature. Journal of Engineering and Mechanical Division, ASCE 104, pp. 1058-1080.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10. 10. 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6. 1. 2019

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“.

10. 10. 2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne.....

.....

Podpis autora práce

Poděkování:

V první řadě bych rád poděkoval svým rodičům, kteří při mně vždy stáli a podporovali, dále vedoucímu své práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za odborné rady, věnovaný čas a trpělivost.

Obsah

Abstrakt	VII
Abstract	VII
Seznam použitých symbolů a zkratk	VIII
Úvod	10
1 Teoretický základ	11
1.1 Charakteristika a dělení dnešních betonů	11
1.2 Procesy a změny v betonu při zvýšené teplotě	12
1.3 Definice vlhkosti a její účinky	12
1.4 Zdroje vlhkosti v objektech	13
1.5 Transport vlhkosti	13
1.6 Procesy v betonu ovlivněné vlhkostí	15
1.7 Vliv vlhkosti v betonu za zvýšených teplot	15
1.7.1 Odštěpování betonu	15
2 Metody měření vlhkosti v betonu za běžné teploty	17
2.1 Metody založené na koncentraci	17
2.1.1 Gravimetrická metoda	17
2.1.2 Gama-denzitometrická metoda	17
2.2 Metody založené na relativní vlhkosti	18
2.2.1 Měření relativní vlhkosti pomocí senzorů	18
2.2.2 Rezistivita	19
2.2.3 Dielektrická metoda	19
2.2.4 Mikrovlnné přístroje MOIST	20
2.2.5 Tepelná metoda	20
2.2.6 Vlhkoměr Hygropin [13]	21
3 Metody měření vlhkosti v betonu za zvýšené teploty	23
3.1 Numerické modely	23
3.1.1 Bažant a Thonguthai (1978) [2]	23
3.1.2 Ichikawa a England (2004)	25
3.2 Nukleární magnetická rezonance [8]	30
3.2.1 Pulsní sekvence	32
3.2.2 Příprava vzorku	32
3.2.3 Charakteristika betonu během experimentu	32
3.3 Neizotermní NMR	34
3.3.1 Teplotní úprava	35
3.4 Závěr	36
4 Praktická část	37
4.1 Návrh experimentu	37
4.2 Charakteristika vzorků a rozmístění termočlánků	37
4.3 Termočlánky a jejich specifikace	40
4.4 Rozmístění měřících pouzder HYGROPIN	40

4.5	Příprava vzorků	41
5	Experiment	46
5.1	Obecné informace	46
5.2	Příprava	46
5.3	Zahájení experimentu.....	48
5.4	Vyhodnocení experimentu	49
5.4.1	Měření relativní vlhkosti před zahříváním vzorků.....	49
5.4.2	Měření relativní vlhkosti po experimentu	52
5.4.3	Úbytek hmotnosti vzorku.....	63
6	Závěr	66
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	71
7	Literatura.....	72

Abstrakt

Práce se zabývá vlhkostí v betonu a jejím měřením při zvýšených teplotách. První kapitola se věnuje teoretickému základu, jako je obecné seznámení s vlhkostí, jejími účinky, zdroji a dělením. V další kapitole jsou shrnuty metody měření vlhkosti v betonu při běžné teplotě. Třetí kapitola má za úkol představit problematiku měření vlhkosti za zvýšené teploty, konkrétně numerické modely zabývající se migrací vlhkosti uvnitř betonu a nukleární magnetickou rezonanci. Poslední kapitola je zaměřená na návrh, provedení a vyhodnocení experimentu v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Experiment je proveden za účelem zjišťování relativní vlhkosti uvnitř betonových vzorků pomocí vlhkoměru Proceq Hygropin při jednostranném zahřívání vzorku a zároveň po celou dobu experimentu je vzorek vážen.

Klíčová slova

Vlhkost; vlhkoměr; beton; teplota; měření; požár

Abstract

The paper deals with moisture in concrete and its measurement at elevated temperatures. This first chapter deals with a theoretical basis, such as general familiarization with moisture, its effects, sources and division. The next chapter summarizes the moisture measurement methods in concrete at normal temperatures. The third chapter is to introduce the issue of moisture measurement at elevated temperatures, namely numerical models dealing with the migration of moisture inside the concrete and nuclear magnetic resonance. The last chapter is focused on the design, implementation and evaluation of the experiment in the laboratory of the Faculty of Civil Engineering of the CTU in Prague. The experiment is performed to determinate the relative humidity inside the concrete samples using a Proceq Hygropin hygrometer in on-sided heating of the sample while the sample is weighed throughout the experiment.

Keywords

Moisture, moisture meter, concrete, temperature, measurement, fire

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské a Řecké symboly

u	Vlhkost	%
RH	Relativní vlhkost	%
w	Volná voda	kg/m^3
J	Vlhkostní tok	$\text{kg/m}^2\text{s}$
w_d	Hmotnost vody na jednotku objemu betonu	kg/m^3
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
c	Specifická tepelná kapacita	J/kg K
c_a	Sorpční teplo volné vody	J/kg
c_w	Specifická tepelná kapacita vody	J/kg K
a	Propustnost betonu	m/s
g	Gravitační zrychlení	m/s^2
P	Pórový tlak	Pa
Φ	Sorpční izotermická funkce	-
τ	Charakteristický čas dehydratace	s
$w_{d,eq}$	Rovnovážná hmotnost vody vzniklá při dehydrataci	kg/m^3
β_w	Povrchová emisivita vody	-
α_c	Konvektivní součinitel přestupu tepla	$\text{W/m}^2\text{K}$
σ_{SB}	Stefan-Boltzmannova konstanta	$\text{W/m}^2\text{K}$
Θ_∞	Teplota okolí	K
D	Difúzní koeficient	m^2/s
m_c	Hmotnost přecházejícího materiálu	kg
$C_i(T)$	Korekční faktor	
Hz	Hertz	
T	Doba relaxace	μs
U	Napětí	kV
E	Energie	kJ/mol

A(i) Amplituda

Zkratky

NMR Nukleární magnetická rezonance

PTFE Polytetrafluorethylen

CSH Hydrid cesný

Ca(OH)₂ Hydroxid vápenatý

Úvod

Vlhkost stavebních materiálů je důležitý parametr, který je třeba hlídat. Stavební materiály se zpravidla nevyskytují v suchém stavu, vždy obsahují určitou vlhkost, která při nadměrném množství ovlivňuje do značné míry tepelně-technické, fyzikální, estetické a v neposlední řadě statické vlastnosti stavebních materiálů a konstrukcí. Tento jev může mít často za následek znehodnocení těchto materiálů a konstrukcí.

V dnešní době známe velké množství metod měření vlhkosti [1], avšak ne vždy jsou tyto metody přesné a nelze je použít při vysokých teplotách.

Migrace vlhkosti uvnitř betonových prvků při zvýšených teplotách je složitým jevem, který úzce souvisí s explozivním odprýskáváním betonu. Explozivní odprýskávání betonu je charakterizováno odloučením betonových dílů v raném stádiu požáru, což má za následek vystavení výztuže přímo ohni, a tedy zhoršení nosnosti a snížení požární odolnosti. Tento jev poukazuje na důležitost pochopení hygrotermálního chování v betonu vystaveném vysokým teplotám.

Nejpřímějším způsobem, jak studovat hygrotermální chování, je měření vývoje teploty, vlhkosti a rozložení tlaku s časem v betonu vystaveném vysokým teplotám.

V současné době existuje několik publikací, které se zaměřují na migraci vlhkosti uvnitř betonových konstrukcí při vysokých teplotách, jako např. [2], [3] a [4], které se zabývají numerickými modely přenosu tepla a vlhkosti pro předvídaní teploty, obsahu vlhkosti a tlaku s přiměřenou přesností. Tyto modely jsou alternativními způsoby nahrazení drahých experimentů. V roce 2010 představili holandský fyzik G.H.A. van der Heijden, H.P. Huinink, L.Pel a K. Kopinga experimentální analýzu vlhkostního transportu uvnitř jednostranně ohřívaného betonu pomocí nukleární magnetické rezonance. Ta umožnila zahřívání vzorku až na 500 °C.

Tato práce je rozdělena do dvou základních částí. První část je zaměřena na teorii. Řeší se v ní vlhkost, dále zdroje vlhkosti a její účinky v betonových prvcích vystavených vysokým teplotám. Dále metody měření vlhkosti v betonu za běžné teploty, které jsou rozděleny na metody založené na koncentraci a na metody založené na relativní vlhkosti. Poslední kapitola teoretické části se zabývá měřením vlhkosti v betonu za zvýšené teploty, konkrétně numerickými modely a nukleární magnetickou rezonancí.

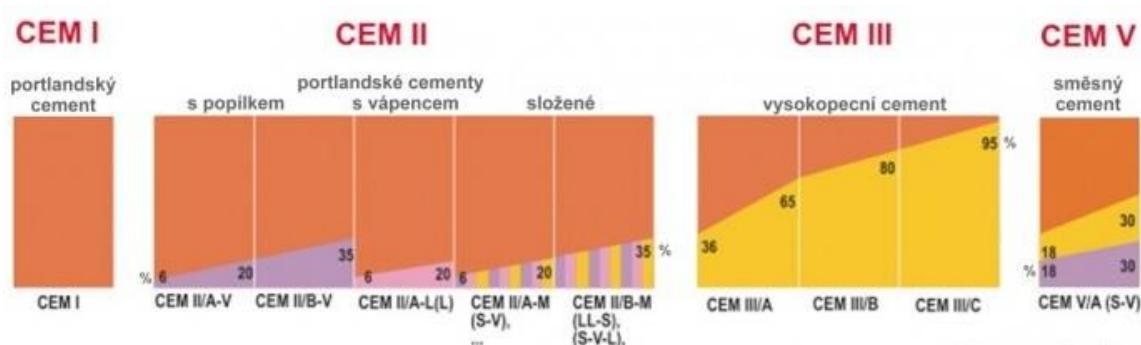
Druhou část této práce tvoří popis experimentu, který je proveden za účelem změření relativní vlhkosti a transportu tepla uvnitř betonových vzorků při jednostranném ohřívání. Tato část je rozdělena do několika kapitol. Nejdříve je popsán návrh experimentu, dále charakteristika vzorků a rozmístění jednotlivých termočlánků pro měření teploty a rozmístění měřících pouzder Hygropin pro měření vlhkosti. Další část této kapitoly tvoří příprava vzorků a samotná betonáž. Dále je provedeno vyhodnocení experimentu.

1 Teoretický základ

1.1 Charakteristika a dělení dnešních betonů

Beton je stavební materiál ze směsi cementu, kameniva a vody. Svých požadovaných vlastností dosáhne smícháním těchto složek. Jeho vlastnosti jsou ovlivňovány jejich poměrem. Zvláštních vlastností u betonu se dosahuje přidáním příměsí a přísad, které zároveň ovlivňují i zpracovatelnost betonové směsi, ale i konečné vlastnosti betonu. Zpracovatelnost betonové směsi je dána konzistencí, kterou lze hodnotit vlastnosti čerstvého betonu.

První složkou betonu je cement. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál. Dělí se do pěti skupin podle ČSN EN 197-1, viz obr. 1.

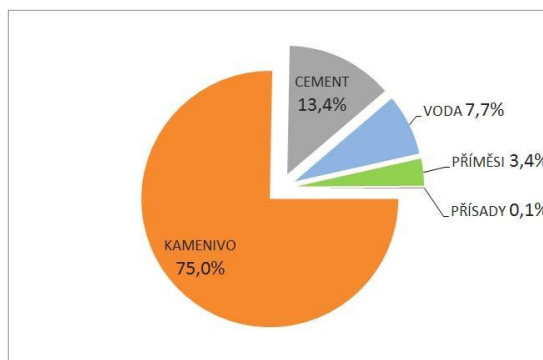


obr. 1 Druhy cementů podle ČSN EN 197-1 (převzato z [5])

Dále se cementy dělí podle vaznosti (32,5; 42,5; 52,5 MPa) a rychlostí náběhu pevnosti (N;R).

Další složku betonu tvoří kamenivo, které se podle původu dělí na přírodní, umělé a recyklované. Kamenivo se dále dělí podle velikosti na jednotlivé frakce, které jsou v rozmezí 0,063–63 mm.

Poslední hlavní složkou betonu je voda, která má v čerstvém betonu dvě funkce: spolupodílí se na hydrataci a ovlivňuje zpracovatelnost betonu. Po smíchání vody s cementem nastává reakce zvaná hydratace, díky které beton začíná tuhnout a tvrdnout. Minimální potřeba vody je zhruba 30 % hmotnosti cementu. Složení betonu lze vidět na obr. 2.



obr. 2 Složení betonu v procentech (převzato z [5])

Beton dělíme do několika skupin podle druhu použitého pojiva, stupně vlivu prostředí, konzistence čerstvého betonu, způsobu dopravy a uložení čerstvého betonu do konstrukce, objemové hmotnosti apod. Podrobnější dělení a rozvádění druhů betonů není součástí této práce.

1.2 Procesy a změny v betonu při zvýšené teplotě

Základní procesy a změny v betonu při zvýšené teplotě jsou zobrazeny v tab. 1.

tab. 1 Změna v betonu při zahřívání (převzato z [6])

Teplota [°C]	Změna
20-100	Přeměna volné vody v chemicky vázanou. Vznik CSH a $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
100	Začíná dehydratace cementového tmele.
150	Vrcholí první fáze rozkladu CSH
200+	Dochází k uvolňování vázané vody
300+	Pokračuje rozklad CSH a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo
550-600	Narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700-750	Vrcholí druhá fáze rozkladu CSH
800+	Hydraulické vazby v cementovém tmele přecházejí na vazby keramické.
900	Totální dekompozice cementového tmele
1000+	Tavení některých složek betonu
1200+	Celkové tavení materiálu

1.3 Definice vlhkosti a její účinky

Vlhkost je fyzikální veličina, kterou za běžných podmínek obsahuje každý materiál a která ovlivňuje vlastnosti daného materiálu. Jedná se o vodu v betonu získanou během výroby, popřípadě během životnosti prvku z okolního prostředí. Ovlivňuje řadu vlastností stavebních materiálů a může mít často za následek degradaci těchto materiálů nebo stavebních konstrukcí.

Přítomnost vody ve stavebních materiálech hraje důležitou roli v mnoha procesech, které jej mohou poškozovat. Zvláště dvě fázové změny vody, mrznutí a vypařování se nejvíce podepisují na poškození betonu.

Vlhkost vyjadřujeme především jako vlhkost hmotnostní, lze jí klasifikovat, jak je uvedeno v tab. 2.

tab. 2 Klasifikace vlhkosti v betonu (převzato z [6])

Vlhkost u [%]	Klasifikace
$u < 3.0$	vlhkost velmi nízká
$3.0 \leq u < 5.0$	vlhkost nízká
$5.0 \leq u < 7.5$	vlhkost zvýšená
$7.5 \leq u < 10.0$	vlhkost vysoká
$10.0 < u$	vlhkost velmi vysoká

1.4 Zdroje vlhkosti v objektech

- Vlhkost výrobní (technologická)
 - jedná se o vlhkost získanou při výrobě materiálu.
- Vlhkost zemní
 - u objektů, které mají poškozenou nebo nemají žádnou hydroizolaci, je zdrojem voda transportována do materiálu na principu kapilárního vztlínání.
- Vlhkost sorpční
 - přijímána materiály z okolního vlhkého vzduchu.
- Zkondenzovaná voda
 - sráží se na povrchu i uvnitř stavebního materiálu (konstrukce), jedná se o vodní páry z exteriérového vzduchu, vodní páry prostupující konstrukcemi obvodových plášťů.
- Provozní vlhkost
 - závisí na využití prostorů, vytápění a větrání.

1.5 Transport vlhkosti

Současně se šířením tepla probíhá v materiálech i přenos vlhkosti, ke které může docházet třemi způsoby:

- sorpci vodní páry,
- difúzi vodní páry,
- vodivosti vlhkosti.

Každý materiál má svoje sorpční izotermy, které vyjadřují vliv relativní vlhkosti vzduchu na rovnovážnou vlhkost stavebního materiálu. Sorpční izoterma betonu pro 20 °C je zobrazena na obr. 3.

Rovnovážná vlhkost stavebního materiálu se vypočítá jako:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%], \text{ kde:}$$

m_w vyjadřuje hmotnost nasyceného materiálu a m_0 hmotnost suchého materiálu.

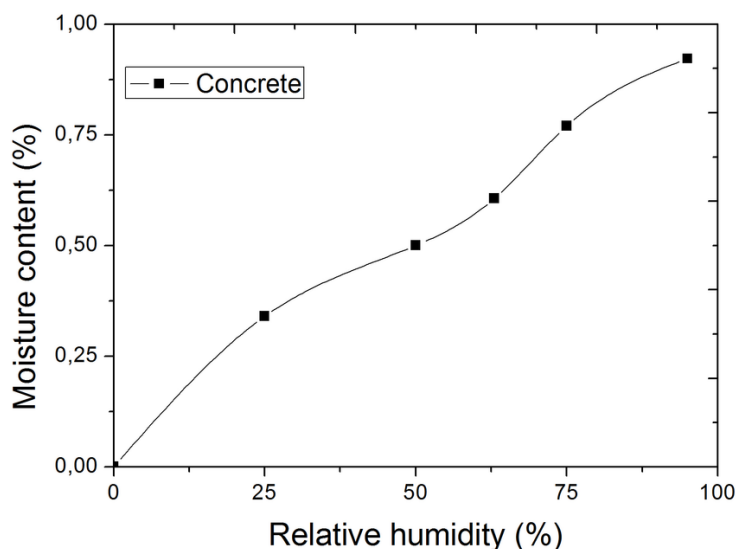
Relativní vlhkost udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch o stejném tlaku a teplotě při plném nasycení, tedy:

$$RH = \frac{m}{M} \cdot 100, \text{ kde:}$$

m vyjadřuje hmotnost vodní páry, která je ve vzduchu obsažená a M hmotnost vodní páry, kterou by obsahoval stejný objem vzduchu, kdyby byl při stejné teplotě a tlaku vodními parami nasycen.

Přijímání vlhkosti pohlcováním vodní páry obsažené ve vzduchu, který materiál obklopuje, se nazývá sorpce vlhkosti. Součástí sorpce je adsorpce, jež je způsobena mezimolekulárními van der Waalsovými silami, kterými se navzájem přitahují molekuly tuhých látek a vodní páry. Adsorpce vede ke vzniku molekulárních vrstev vodní páry na stěnách pórů a jejich tloušťka závisí především na relativní vlhkosti vzduchu. [7]

Roste-li množství vlhkosti ve vzduchu, dochází k sorpci a naopak, klesá-li množství vodní páry, tak dochází k desorpci.



obr. 3 Sorpční izoterma betonu pro 20 °C (obrázek převzat z [7])

Změny relativní vlhkosti ovlivňují i objemové změny pórovitých materiálů, protože změnou kapilárních sil uvnitř pórů dochází k deformaci stěn těchto pórů.

Nevykazuje-li materiál v čase žádný přírůstek ani úbytek vlhkosti, tak mluvíme o rovnovážné sorpční vlhkosti.

1.6 Procesy v betonu ovlivněné vlhkostí

Beton v souvislosti s vlhkostí má několik významných teplot. Při dosažení teploty 100 °C se začne vázaná voda v pórech postupně vypařovat společně s vlhkostí a dochází k dehydrataci cementového tmelu. Při teplotě 120 °C se zcela vypaří volná voda z betonu. Jakmile se teplota dostane na 150 °C, tak začne docházet ke ztrátě i chemicky vázané vody a první fáze rozkladu CSH gelu. Tento děj probíhá až do teploty 300 °C. V tomto rozmezí beton nepatrně nabývá na své pevnosti. Při teplotách vyšších jak 300 °C dojde k výraznějšímu nárůstu pórovitosti a mikrotrhlin a prvnímu poklesu pevnosti betonu. Teplota 374 °C je kritický bod pro vodu, nad touto teplotou voda neexistuje v kapalném skupenství. Při teplotě 550 °C dochází k dalšímu výraznému poklesu pevnosti. Při teplotě 700 °C dochází k tepelnému rozkladu vápence v pojivu a kamenivu. Při teplotě vyšší jak 800 °C dochází k rozpadu struktury betonu a ke vzniku keramické vazby. Při teplotách 1000 °C se začínají tavit některé složky betonu a po dosažení 1200 °C se beton taví. [8]

1.7 Vliv vlhkosti v betonu za zvýšených teplot

Extrémním případem poškození budovy, na kterém se podílí vlhkost materiálu je požár. Pokud se jedná o požár v tunelu nebo v budově, povrch betonové stěny se zahřeje na teplotu výrazně nad 100 °C během několika minut a stoupá až k 1200 °C. Vlhkost v betonu se začne vypařovat a vodní pára může unikat pouze přes ohříváný povrch. Protože je beton velmi nízkopropustný materiál, dochází k vytváření vysokých tlaků. Kombinace těchto vysokých tlaků, tepelného namáhání od velkých teplotních gradientů a oslabení porézní matrice dehydratací může způsobit odprýskávání betonu. [8]

Přenos tepla a odprýskávání betonu při vysokých teplotách hrají důležitou roli. Oba tyto procesy se dějí uvnitř stavebního materiálu.

Při dosažení teploty 100 °C se voda začne značně odpařovat z betonu. Odpařováním vody z betonu se začne zvyšovat pórový tlak v mikrostruktuře. Tímto procesem při vysoké vlhkosti a vysoké hustotě mikrostruktury může dojít k vysokému pórovému tlaku, který může způsobit explozi a odštěpení části betonu. To následně ovlivňuje požární odolnost prvku. V nejhorsím případě může dojít až k statickému selhání prvku a zřícení konstrukce.

Proto se u betonů snažíme o co nejmenší procento vlhkosti, aby k odštěpování nedocházelo. Za přijatelnou vlhkost se uvažuje maximální hodnota 3 %. [8]

1.7.1 Odštěpování betonu

V souvislosti s vlhkostí může docházet u betonu k odštěpování, které zahrnuje explosivní odprýskávání a oddělování povrchové vrstvy betonu. Při vlhkosti betonu menší než 3 % hmotnosti

je vznik odštěpování velice nepravděpodobný. Při vyšších vlhkostech je zapotřebí vzít v potaz obsažené kamenivo, propustnost betonu a rychlost jakou je konstrukce zahřívána.

Odpadávání betonu může nastat v pokročilém stadiu požáru u prvků, které mají krytí výztuže větší než 70 mm, pokud nebylo zkouškami prokázáno jinak. V tomto případě se odpadávání eliminuje přidáním povrchové výztuže o průměru nejméně 4 mm. [9]

2 Metody měření vlhkosti v betonu za běžné teploty

Voda v betonu je přítomna ve třech stádiích: jako volná voda zadržaná kapilaritou, jako absorbovaná voda zadržaná povrchovými silami a jako chemicky vázaná voda. Ideální metoda měření vlhkosti v betonu by se měla zaměřit na všechny tyto tři stádia, to je ale obtížné, jelikož vlhkost v betonu není rovnoměrně rozložená a rozložení vlhkosti se liší v čase. Teplota, rychlost proudění okolního vzduchu a relativní vlhkost prostředí jsou proměnné, které je třeba vzít v úvahu i v okamžiku měření vlhkosti. Většina metod pro stanovení difuzivity vlhkosti jsou založena na analýze změny profilu vlhkosti v čase. [1]

2.1 Metody založené na koncentraci

2.1.1 Gravimetrická metoda

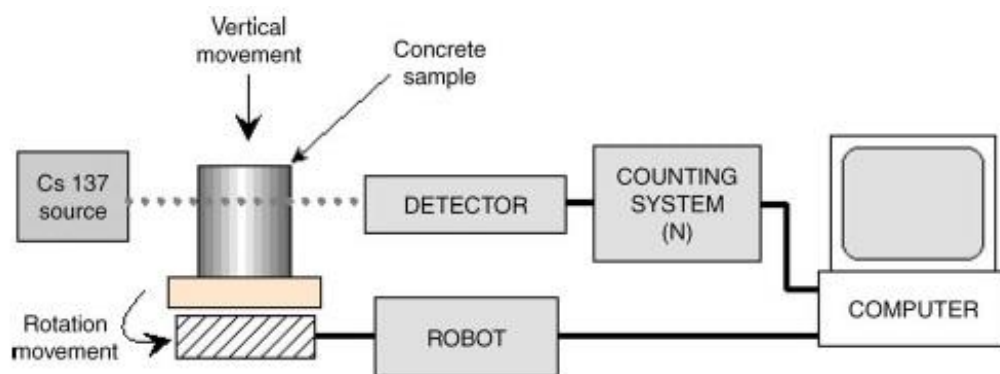
Gravimetrická metoda spočívá v určení obsahu vody pomocí vážení vzorků v peci sušením. Vzorek zahrnuje vodu absorbovanou a chemicky vázanou. Na místě jsou umístěny automatické vlhkostní analyzátory, které využívají infračervené lampy jako zdroj tepla. Tato technika měří ztrátu hmotnosti betonových kusů a porovnává je s původní hmotností. Odběr vzorku se provádí ručním vysekáváním. Použití příklepové vrtačky se nedoporučuje, avšak není to zakázáno. Při jejím použití dochází k ohřívání a tím pádem vysušování materiálu, což může zkreslovat výsledek. [1]

Výsledky mohou být vyjádřeny jako hmotností rozdíl, tedy rozdíl hmotnosti prvku s vodou k suché hmotnosti betonového prvku nebo jako objemový rozdíl, rozdíl objemu vody k celkovému objemu betonového vzorku.

Tato metoda se považuje za nejspolehlivější postup i přes to, že se požaduje velký počet vzorků. Pro každé měření by měly být použity různé vzorky a měřený pouze průměrný obsah vody v každé části vzorku. Jedná se o jednu z mála metod, kterou lze použít i při vysokém obsahu vlhkosti. [1]

2.1.2 Gama-denzitometrická metoda

Jedná se o nedestructivní metodu, která se běžně používá k zjišťování hustoty stavebních materiálů. Měří také gradienty obsahu vody v betonových vzorcích. Vzhledem k vysokému koeficientu absorpce gama paprsku je skutečně možné odhalit malé rozdíly v obsahu vody v betonu. Nastavení gama záření je zobrazeno na obr. 4. [10]



obr. 4 Nastavení gama záření (obrázek převzat z [10])

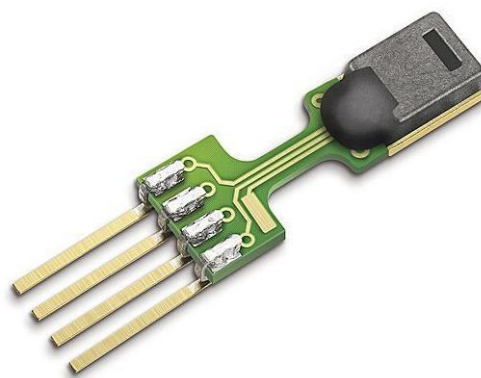
2.2 Metody založené na relativní vlhkosti

2.2.1 Měření relativní vlhkosti pomocí senzorů

Vysoce kvalitní snímače relativní vlhkosti jsou obvykle vyrobeny z lidských vlasů nebo z koňských žíní. [1]

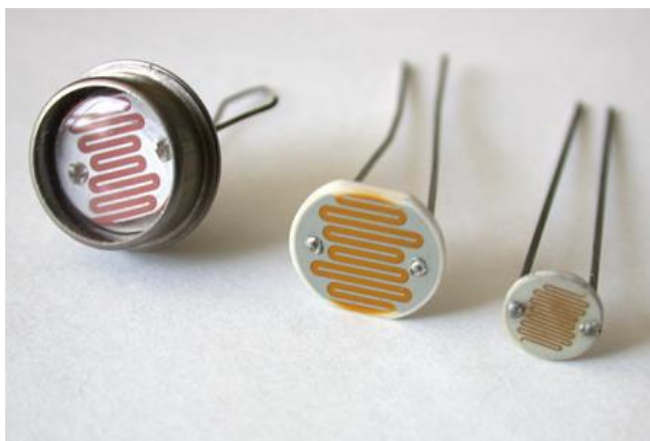
Existují dva hlavní typy snímačů relativní vlhkosti, kapacitní a odporový. Kapacitní snímač se skládá z tenké vrstvy polymerního nebo anorganického materiálu absorbujícího vodu, který je na vodivé základně. Na obr. 5 lze vidět kapacitní senzor. [1]

Odporový senzor relativní vlhkosti je tenká oplatka absorpčního polymeru. Měří se elektrický odpor po povrchu polymeru, který je závislý na změnách obsahu vodu. Odporový senzor je zobrazen na obr. 6. [1]



obr. 5 Kapacitní senzor (obrázek převzat z [1])

Tyto snímače byly používány ve vysokohodnotných výzkumech, a to většinou ve stavebních studiích, kde nebylo rychlé docílení výsledků důležitým aspektem, protože tyto senzory mají poměrně pomalou funkci reakce na změny relativní vlhkosti. [1]

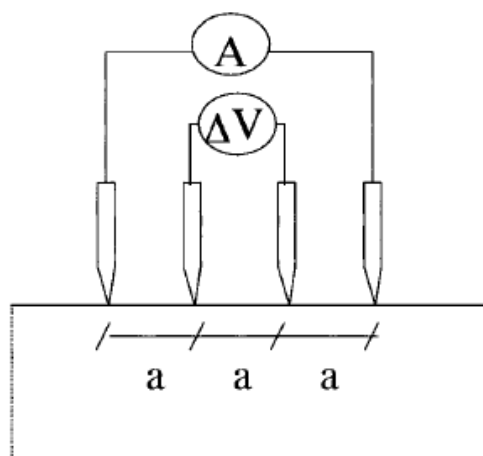


obr. 6 Snímač odporu (obrázek převzat z [1])

2.2.2 Rezistivita

V pórovitém materiálu se měří odpor při zvýšení obsahu vlhkosti. To z důvodu, že rezistivita pórovité tekutiny je menší než rezistivita pevného základu. Vlhkost změny obsahu lze sledovat měřením změn elektrického odporu materiálu. Monitorovací rezistivita ukáže, na kterých místech dochází ke změnám vlhkosti. [11]

Na obr. 7 lze vidět experimentální sestavu pro měření odporu pomocí 4 elektrod. [1]



obr. 7 Měření specifického odporu pomocí 4 elektrod (obrázek převzat z [1])

2.2.3 Dielektrická metoda

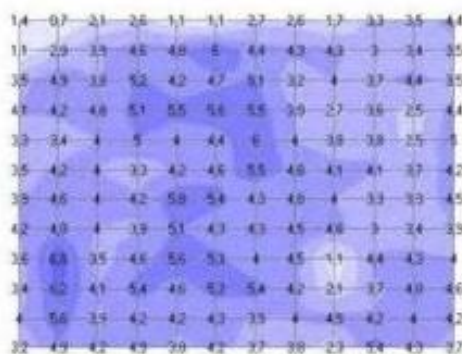
Kolem roku 1955 začal vývoj tzv. mikrovlnných metod měření vlhkosti, ale jeho skutečné využívání začalo až po roce 1980, kdy se na trhu objevily zařízení použitelné pro tuto metodu. Mikrovlnné vlhkoměry jsou naladěny na rezonanční kmitočet vody. Vlhkoměr vysílá do betonu rádiové vlny na mikrovlnném kmitočtu. Podle obsažené vlhkosti dochází k odrazu těchto rádiových vln. Vlhkostní sondy se liší podle konstrukce antény, čímž jsou také dány různé možnosti hloubky měření. Sondy se měří do hloubky až 50 cm. [1]

Vyhodnocením těchto vlhkoměrů bývají vlhkostní mapy, které zobrazí rozložení vlhkosti v materiálu. [1]

2.2.4 Mikrovlnné přístroje MOIST

Přístroje obsahují strukturovanou paměť s možností snadného vytvoření vlhkostní mapy. Nejprve je vertikálně a horizontálně zadán počet bodů, poté se velice rychle přikládá sonda a poté se stiskne tlačítko pro zaznamenání hodnoty. Pokud jsou vytvořeny dvě vlhkostní mapy pro různé hloubky, je možné je porovnat, zda je vlhkost způsobena kondenzací z interiéru nebo zda voda prosakuje z exteriéru. [12]

Na obr. 8 lze vidět vlhkostní mapu se sondou ve 3 cm a na obr. 9 lze vidět vlhkoměr MOIST.



obr. 8 Příklad vlhkostní mapy se sondou ve 3 cm (obrázek převzat z [12])



obr. 9 Vlhkoměr MOIST (obrázek převzat z [12])

2.2.5 Tepelná metoda

Stejným způsobem kapacitních metod, odporové metody nebo dielektrické metody může být vlhkost pórovitého materiálu stanovena nedestruktivně z místních měření tepelné vodivosti nebo difuzivity, pokud jsou k dispozici kalibrační údaje a tepelné vlastnosti s vlhkostí. Malé teplotní sondy a ohříváče jsou implantovány nebo vloženy do betonu a tepelná odezva je měřena jako funkce času po aktivaci ohříváče nebo tepelného zdroje. Vybavení je levné a dostatečně malé na to, aby umožnil měření vlhkosti. [1]

Změny tepelné vodivosti s obsahem vlhkosti ze suchého na nasycený materiál je přibližně lineární, takže tepelná vodivost odráží celkovou odpařitelnou vodu a nerozlišuje absorbovanou a volnou vodu. [1]

2.2.6 Vlhkoměr Hygropin [13]

Jedná se o vlhkoměr, který je založený na měření relativní vlhkosti v betonu. Zkouška relativní vlhkosti je popsána normou ASTM F2170-09. Přístroj se skládá z indikačního přístroje, ke kterému jsou dodávány 2 sondy, jedna pro měření vlhkosti pod povrchem betonu (sonda o průměru pouze 5 mm – lze použít i pro průběžná měření, kdy lze například již při betonování desky do ní vložit měrné kolíky o průměry 8 mm a vkládáním sondy registruje změny vlhkosti) a sondy pro měření vlhkosti okolí.

Obsah vlhkosti uvnitř betonu je odlišný od obsahu vlhkosti na povrchu. Hygropin využívá in-site technologie, která identifikuje skutečný obsah vlhkosti uvnitř betonu. Na obr. 10 lze vidět plastové pouzdro sloužící pro sondu přístroje.



obr. 10 Pouzdro pro standartní a čerstvé betonové aplikace (obrázek převzat z [13])

In-site sonda se skládá ze skříně z nerezové oceli, která se dokonale hodí do drsného prostředí na stavbě. Sonda a přístroj jsou připojeni kabelem o délce 2 m a lze je vidět na obr. 11.



obr. 11 In-site sonda (obrázek převzat z [13])

Sonda pro měření vlhkosti okolí je přímo připojena k přístroji, zachycuje environmentální parametry. Teplota, relativní vlhkost a vlhkost jsou měřeny stejně jako u in-site sondy.

Měřicí pouzdro se používá pro všechny aplikace. Díky ukazateli délky a označených drážkách je řezání na požadovanou délku jednoduché. Pro uložení pouzdra stačí otvor o průměru 8 mm. Znovu uzavíratelné křemíkové víčko těsně uzavírá otvor a vložku. Měřicí obal s již připravenou požadovanou délkou je zobrazen na obr. 12.



obr. 12 Měřicí obal (obrázek převzat z [13])

Spolu s měřícím pouzdrům se používá doplněk pro mokrý beton, který umožňuje předinstalování otvorů v čerstvém betonu. Před položením betonu se měřicí pouzdro připevní na bednění. Táhlo umístěné uvnitř pouzdra vyloučí čerstvý beton ze vstupu do vložky. Jakmile beton vytvrdne, může být prut nahrazen in-site sondou pro sledování relativní vlhkosti během tvrdnutí. Doplněk pro mokrý beton je vidět na obr. 13.



obr. 13 Doplněk pro mokrý beton (obrázek převzat z [13])

3 Metody měření vlhkosti v betonu za zvýšené teploty

Měření vlhkosti uvnitř betonu za zvýšených teplot je poměrně složitý jev. Existuje několik metod, které se zaměřují na migraci vlhkosti uvnitř betonových prvků při zvýšené teplotě. Konkrétně van der Heijden a kol. [8], představili v roce 2010 experiment pomocí NMR metody, která je schopna změřit vlhkost uvnitř betonu při jednostranném ohřevu v čase. Tomuto experimentu předcházely studie hygrotermálního procesu měření vlhkosti a rozložení tlaku ve vyhřívaném betonu. Bažant a Thonguthai [2] v roce 1978 vyvinuli jednorozměrné a dvourozměrné metody konečných prvků pro předvídání pórového tlaku ve vyhřívaném betonu řešením rovnic přenosu tepla a vlhkosti.

3.1 Numerické modely

Z důvodu velkých nákladů na zřízení experimentů, který by přesně změřily průběhy vlhkosti uvnitř betonových prvků během zvýšených teplot, se v dnešní době uplatňují numerické analýzy, které odhadují migraci vlhkosti a zvýšení tlaku v betonu. Numerické modely pro přenos tepla a vlhkosti jsou navrhovány za účelem spolehlivé predikce změn teplot, vlhkosti a tlaku pórů s ohledem na měnící se vlastnosti betonu v čase/nebo s teplotou.

3.1.1 Bažant a Thonguthai (1978) [2]

V roce 1978 představili Bažant a Thonguthai [2] matematický model přenosu tepla a vlhkosti uvnitř betonu, který byl vystaven teplotám vyšším než 100 °C.

3.1.1.1 Představení modelu s jednou tekutou fází

Jedná se o model transportu vlhkosti založeného na experimentálních měřeních. Tento model je formulován pouze jednou tekutou fází označenou jako w [kg/m³], což zahrnuje veškerou volnou vodu, která je odpařitelná při dané teplotě.

Bažantův model je definován dvěma zákony ochrany: ([2], rovnice (5), (6))

Rovnice hmotnostní bilance:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot J = \frac{\partial w_d}{\partial t}, \quad (1)$$

Rovnice energetické bilance:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} - c a \frac{\partial w}{\partial t} - c w \nabla \theta \cdot J = -\nabla \cdot q c d \quad (2)$$

kde J [kg/m²s] představuje vlhkostní tok, w_d [kg/m³] je hmotnost vody (na jednotku objemu betonu) vznikající při dehydrataci, ρ [kg/m³] je hustota, c [J/kgK] je specifická tepelná kapacita betonu, c_a [J/kg] je sorpční teplo volné vody a c_w [J/kgK] je specifická tepelná kapacita vody.

Konstitutivní vztahy

Při zanedbání křížových efektů (Soretův tok, ([2], str. 1059-1060), se vlhkostní tok určí jako ([2], rovnice (3))

$$J = -\frac{a}{g} \nabla \cdot P, \quad (3)$$

kde a [m/s] je propustnost betonu, $g = 9,81$ [m/s²] je gravitační zrychlení a P [Pa] je párový tlak.

Tepelný tok v důsledku vedení je definován podle Fourierova zákona ([4], rovnice 2.2)

$$q_{cd} = -\lambda_c \nabla \cdot \vartheta, \quad (4)$$

Rovnice volné vody může být vyjádřena tzv. sorpční izotermickou funkcí Φ podle ([2], rovnice (7)-(9)), resp. podle ([14], rovnice (98)).

$$w = \Phi(P, \vartheta) \quad (5)$$

Hmotnost vody vznikající dehydratací může být určena empirickými vztahy v závislosti na teplotě a v některých případech také v závislosti na jiných parametrech, jako je hmotnost cementu, staří betonu, atd., ([4], rovnice (3.5))

$$\frac{\partial w_d}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} (w_d - w_{d,eq}(\vartheta)), \quad (6)$$

kde $w_{d,eq}$ [kg/m³] představuje rovnovážnou hmotnost vody vzniklou při dehydrataci při dané teplotě [K] a τ je charakteristický čas dehydratace.

Okrajové a počáteční podmínky

Vlhkostní tok na hranici lze předpokládat konvektivním hraničním stavem ([2], rovnice (22))

$$J n = \beta_w (P - P_\infty) \quad (7)$$

kde β_w je povrchová emisivita vody. Dokonale utěsněný povrch betonu ($J = 0$) je omezujícím příkladem pro $\beta_w = 0$ a perfektní přenos vlhkosti na povrchu ($P = P_\infty$) je omezujícím příkladem pro $\beta_w = \infty$. P_∞ představuje tlak par v okolí.

Pro tepelný tok na hranici lze předpokládat smíšený konvektivní a radiační okrajový stav. ([4], rovnice (2.3))

$$q_{cd} n = \alpha_c (\vartheta - \vartheta_\infty) + e\sigma_{SB} (\vartheta^4 - \vartheta_\infty^4), \quad (8)$$

kde α_c [W/m²K] je konvektivní součinitel přestupu tepla, e [-] je povrchová emisivita, $\sigma_{SB} = 5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K je Stefan-Boltzmannova konstanta a ϑ_∞ [K] je teplota okolí.

Výše uvedené hraniční podmínky lze aplikovat na libovolné hranici, protože typ expozice může být určen příslušným nastavením proměnných β_w , α_c a e . [4]

Počáteční podmínky ve formě

$$P(0) = P_0, \quad (9)$$

$$\vartheta(0) = \vartheta_0, \quad (10)$$

$$w_d(0) = 0, \quad (11)$$

Představují počáteční rozdělení primárních neznámých modelů v čase $t = 0$ (lze si všimnout, že počáteční obsah vody $w(0)$, je dán teplotou ϑ_0 a P_0 přes sorpční izotermy (5)). [4]

Numerické řešení popsáno například v [4].

3.1.2 Ichikawa a England (2004)

Matematický a výpočetní model je určený pro předpověď přenosu tepla, vlhkosti a pórových tlaků. Výhodou tohoto modelu je to, že je schopný přesně a jednoduše vypočítat tlak, hustotu a dynamickou viskozitu vody.

Model představuje betonovou stěnu, která má tloušťku L a její plocha je použita pro analýzu přenosu tepla a vlhkosti. Betonová stěna je ohřívána na horkém povrchu ($x=0$) a na druhém konci stěny je studený vzduch ($x=L$). Obecně transport vlhkosti uvnitř betonu závisí na velikosti pórů. Póry jsou zcela nebo částečně naplněny volnou vodou, která se přes ně pohybuje. Množství chemicky vázané vody může být stanoveno jako neodpařitelný obsah vody (m_{nw}) a celkové množství volné vody a gelové vody může být určeno jako obsah odpařitelné vody (m_{ew}). Jak teplota stoupá, gelová a chemicky vázaná voda se uvolňuje do pórů dehydratací, v důsledku tohoto jevu se objem pórů zvyšuje. [3]

3.1.2.1 Diferenciální rovnice pro teplo a vlhkost

Přenos tepla je řízen tepelným vedením. Rovnice pro přenos tepla je uvedena jako:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (21)$$

kde ρ , c , λ a T jsou hustota, specifické teplo, tepelná vodivost a teplota betonu.

Přenos vlhkosti je výsledkem dvou kombinovaných účinků: (1) toku vyvolaného tlakem odvozeného z Darcyho zákona a (2) difúzní tok odvozený z Fickova zákona. Během zahřívání se z cementové pasty uvolní gelová a chemicky vázaná voda do betonových pórů jako volná voda. Tento fakt je vzatý v úvaze při analýze přenosu vlhkosti. [3]

Rovnice pro přenos vlhkosti

$$\frac{\partial m_{fw}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \left(\frac{\rho_{fw}}{\eta_{fw}} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \left(\frac{\partial m_{fw}}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial t} (m_{gw-rel} + m_{nw-rel}) \quad (22)$$

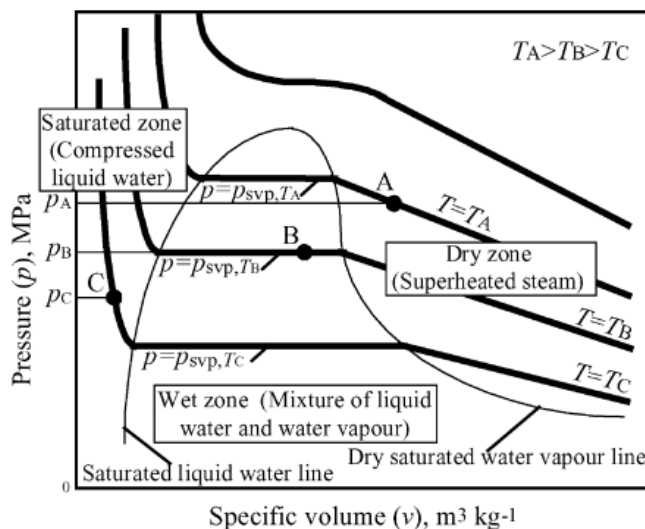
kde m_{fw} , k , D , p , ρ_{fw} , η_{fw} , m_{gw-rel} a m_{nw-rel} jsou obsah vlhkosti (hmotnost volné vody), propustnost, difúzní koeficient betonu, tlak, hustota, dynamická viskozita vody, hmotnost uvolněné gelové vody a hmotnost uvolněné chemicky vázané vody.

3.1.2.2 Počáteční a hraniční podmínky

Počáteční podmínkou přenosu tepla je rovnoměrné rozdělení teploty T . Počátečními podmínkami pro přenos vlhkosti jsou rovnoměrně rozložené hmotnosti tří forem vody (chemicky vázané m_{nw} , gelové vody m_{gw} a volné m_{fw}) a objemu pórů V_p . Všechny tyto složky závisí na poměru voda / cement (w/c), množství vody při míchání (m_{tw}), obsahu vzduchu V_{air} a stupni hydratace α_h . Hraniční podmínky pro přenos tepla jsou specifikovány jako konvektivní a radiální výměna tepla mezi hraniční plochou a okolním prostředím. Hraniční podmínky pro přenos vlhkosti závisí na těsnicích podmínkách, pokud je povrch vzorku utěsněn, tak není uvažován žádný přenos vlhkosti mezi hraniční plochou a okolním prostředím, pokud je povrch uvolněn, tak se tlak na povrchu rovná tlaku prostředí. [3]

3.1.2.3 Zvýšení tlaku

Transport vlhkosti uvnitř betonu vede k vytvoření suché (A), vlhké (B) a nasycené (C) zóny. Obecně platí, že $T_A > T_B > T_C$ v blízkosti zdroje tepla. Odpovídající tlaky pórů, $p_A > p_B > p_C$ se každý mění s časem jinak a generují tok. [3]



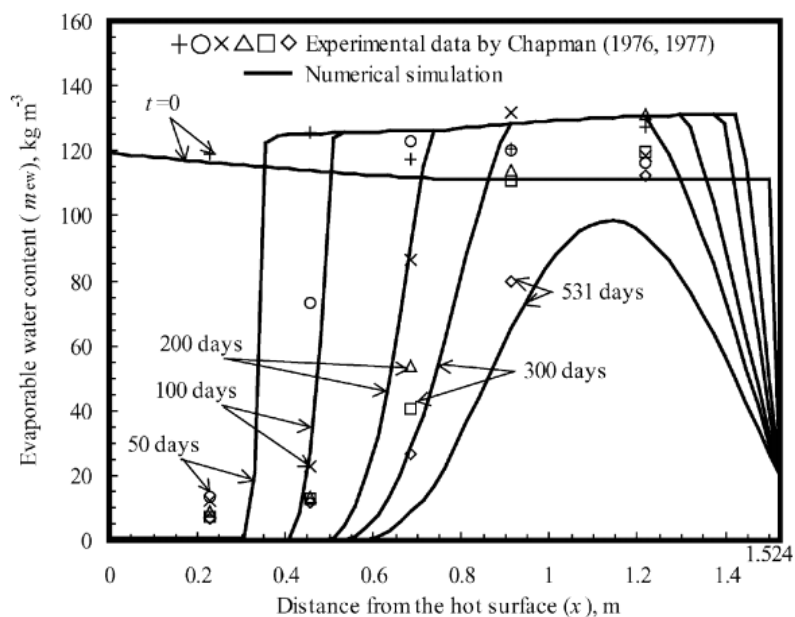
obr. 14 Závislost tlaku a objemu ve vztahu k obsahu vody na teplotě (převzato z [3])

Numerická simulace

Číselné výsledky analýzy přenosu tepla a vlhkosti z tohoto modelu jsou porovnávány s údaji ze dvou sad experimentů prováděných za účelem zkoumání migrace vlhkosti a chování při vytváření tlaku v betonové stěně reaktoru při vysokých teplotách. Experimentální soubory byly následující: [3]

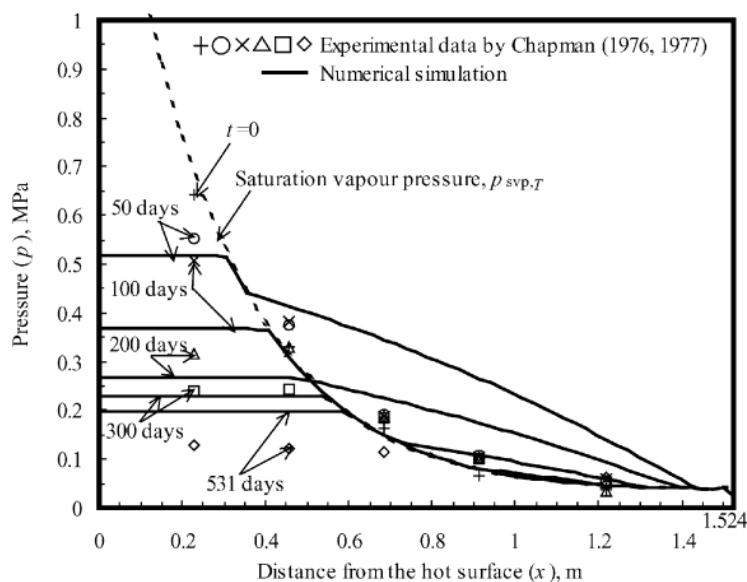
- (1) Dlouhodobá (531 dnů) zkouška migrace vlhkosti za ustáleného teplotního křížení; maximální teplota 200 °C.
- (2) Krátkodobý (114 min.) test tlaku při přechodném ohřevu až na 400 °C.

Na obr. 15 lze vidět rozložení obsahu odpařitelné vody v betonových prvcích při různých dobách ohřívání. Vlhkost v zahřáté oblasti se pohybuje směrem ke studené kvůli tlaku vyvolanému průtokem. Proto se obsah odpařitelné vody v blízkosti horké plochy postupně snižuje a objeví se suchá zóna. V suché zóně je hodnota odpařitelné vody velmi malá, tato zóna se s časem zvětšuje. Ve středu vzorku odpařitelná voda překračuje počáteční obsah odpařitelné vody. V této oblasti betonu jsou póry naplněny vodou. Jedná se tedy o nasycenou zónu, která se s časem pohybuje směrem ke studenému povrchu.



obr. 15 Srovnání simulovaných a experimentálních distribucí obsahu odpařitelné vody v různých časech (obrázek převzat z [3])

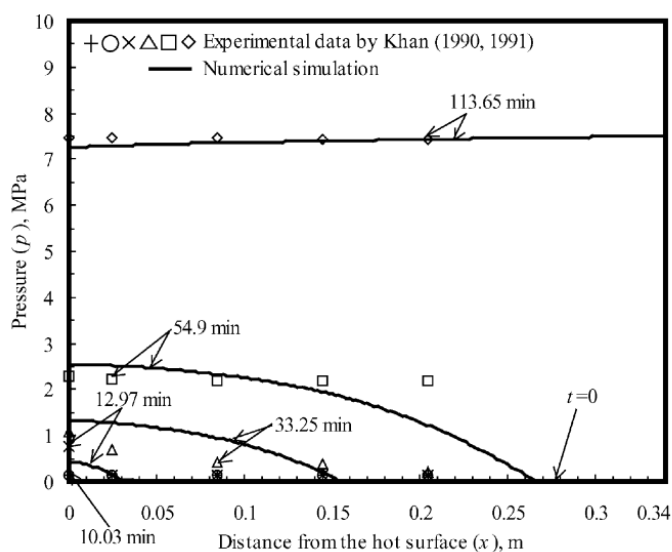
Na obr. 16 je znázorněno simulované a experimentální porovnání rozložení tlaku v betonových vzorcích při různých dobách ohřívání. Na počátku ohřevu ($t=0$) se numerická simulace a experimentální data rovnají tlaku saturace par ($p_{\text{svp},T}$). Po zahájení ohřevu se tlak v suché zóně postupně snižuje v důsledku ztráty vlhkosti. Suchá zóna může být identifikována na obrázku, protože hodnoty tlaky jsou rovnoměrné a menší než tlak nasycených par. [3]



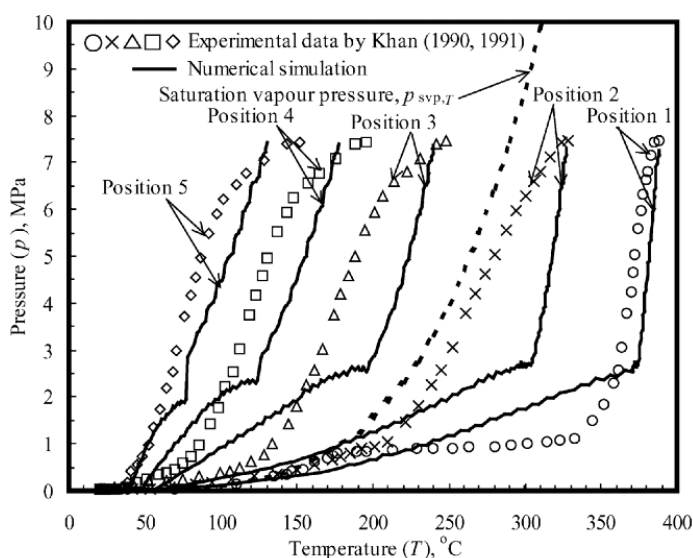
obr. 16 Srovnání simulovaných a experimentálních rozložení tlaku v různých časech (převzato z [3])

Na obr. 17 lze vidět porovnání simulovaného a experimentálního rozložení tlaku při různých dobách ohřívání. Po zahřátí se tlak zvyšuje s časem a v horké oblasti se vyskytují tlakové přechody. Distribuce tlaku se postupně stává stejná s časem.

Na obr. 18 lze vidět porovnání simulovaného a experimentálního vztahu tlaku a teploty v pěti různých polohách betonového vzorku. Dochází k rychlé migraci vlhkosti blízko horké plochy (poloha 1 a 2) a tlaky spadají pod tlak nasycených par ($p_{\text{svp},T}$) po pouhých 10 minutách od začátku ohřevu. Poté se tlak s rostoucí teplotou zvyšuje, ale stále zůstává pod tlakem nasycených par. Tlak v polohách 3, 4 a 5 je však vždy vyšší než tlak nasycených par. Proto jsou tyto pozice v průběhu experimentu v nasycené zóně. [3]



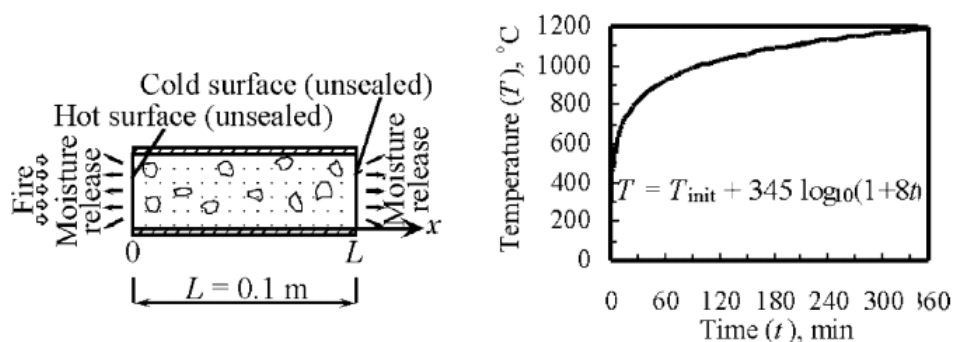
obr. 17 Srovnání simulovaných a experimentálních rozložení tlaků v různých časech (převzato z [3])



obr. 18 Srovnání simulovaných a experimentálních vztahů mezi tlakem a teplotou v pěti polohách (obrázek převzat z [3])

3.1.2.6 Numerický model

Ichikawův model představuje betonovou stěnu délky L , jak je znázorněno na obr. 19. Jak horký povrch ($x=0$), tak studený povrch ($x=L$) jsou uvolněny. Stěna je zahřívána pouze na jednom povrchu.



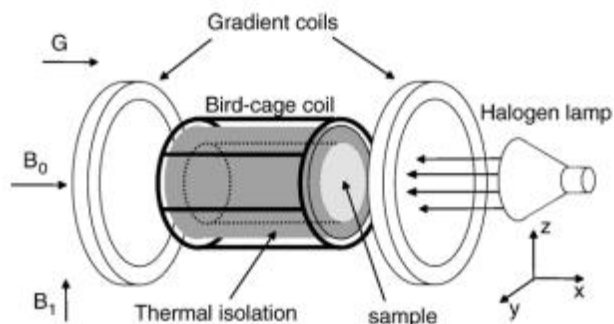
obr. 19 Jednorozměrný model (obrázek převzat z [3])

Matematický a výpočetní model je určený pro předpověď přenosu tepla, vlhkosti a pórového tlaku při vysokých teplotách. Slouží pro simulaci krátkodobých, ale i dlouhodobých účinků ohřívání v betonu, když se vlhkost pohybuje jednostranně a lze ho využít pro určení všech tří neznámých. Numerický model je detailně popsán v [3].

3.2 Nukleární magnetická rezonance [8]

V roce 2010 představil holandský fyzik G.H.A. van der Heijden a kol. NMR metodu, která je schopná jednorozměrně změřit vlhkostní profily v ohříváných materiálech. Skener, který je umístěn ve vývrtnu v materiálu, je schopen dosáhnout teplot až 500 °C. Metodika tohoto měření je zavedena pro korekci teplotních účinků při těchto zvýšených teplotách. Opravy jsou založeny na Curiově zákonu o paramagnetismu a pozorované teplotní závislosti relaxačních mechanismů vyskytujících se v pórovitých materiálech. Obě tyto korekce se používají k získávání profilu vlhkosti z profilu NMR signálu.

Součástí tohoto výzkumu byl experiment, který se prováděl na betonovém válci, kde byl prezentován jednostranný ohřev betonu s obsahem vlhkosti v rovnováze s 97% RH. Tento druh experimentu je zvláště zajímavý ve výzkumu o požáru v betonu, protože přímo odhaluje přepravu vlhkosti a tepla, která se vyskytuje uvnitř betonu. Získané profily vlhkosti odhalují vrchol vlhkosti, který se vytváří blízko ohříváného povrchu, což vede k nasycené vrstvě a následnému odlupování vrstvy betonu.



obr. 20 Schématický diagram nastavení NMR. (Obrázek převzat z [8])

Pro odesílání vysokofrekvenčních pulsů B_1 a přijetí NMR signálu ze vzorku se použila vestavná cívka, která byla vyrobena z měděných pásů zabalených kolem trubice s oxidem hlinitým. Cívka měla průměr 140 mm a byla dlouhá 140 mm. Byla typu birdcage, a proto se díky ní vytvořilo homogenní pole B_1 kolmo k dlouhé ose válcovitého vzorku. Cívka byla umístěna rovnoběžně s hlavním magnetickým polem, což umožnilo optimální využití volného prostoru uvnitř vrtání a byla navržena s vnitřním štítem Faraday, aby nedošlo ke změnám dielektrické konstanty vzorku. Tímto způsobem bylo možné provádět kvantitativní měření vlhkosti. Schéma tohoto experimentu lze vidět na obr. 20.

Trubice odolávala teplotám, které byly daleko vyšší než požadavky experimentu (teplota tání $2072\text{ }^\circ\text{C}$) a neposkytovala žádný signál na pozadí, což bylo důležité při měření obsahu vlhkosti při vysoké teplotě. Dva trimovací kondenzátory s napětím 12 kV byly použity pro ladění a přizpůsobení. Pro zajištění konstantní rezonanční frekvence a citlivosti cívky byly použity kondenzátory s vysokou teplotní stabilitou.

Pro dosažení relativně krátkých RF pulsů potřebných pro NMR měření se použil vysokovýkonný RF zesilovač (3,6 kW, 63,9 MHz). Faradayova klec, která byla umístěna kolem cívky, měla dvojitý účel: chránila NMR cívku před rušivými RF signály a zabraňovala RF pulsům dosáhnout elektronickým systémům lékařského skeneru.

Za účelem simulace podmínek, ke kterým dochází při požáru, musel být beton rychle ohříván. V experimentu se použily čtyři halogenové žárovky o výkonu 100 W, které byly schopné generovat tepelný tok 12 kW/m^2 a tím napodobily vlastnosti požáru uvnitř NMR. Reflektory svítlen byly pozlacené, aby zajistily maximální odraz infračerveného záření směrem k povrchu vzorku. Maximální teplota, kterou lze dosáhnout při tomto experimentu na ohřívaném povrchu, je asi $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$. Ačkoliv se nedosahuje maximálních teplot, které vznikají při požáru v reálném měřítku (zhruba $1000\text{ }^\circ\text{C}$), rozmezí teplot se týkalo těch nejzajímavějších procesů souvisejících s vlhkostí, jako je vypařování při teplotách vyšších jak $100\text{ }^\circ\text{C}$, ucpání vlhkosti a dehydratace betonu.

Teploty uvnitř vzorku byly měřeny pomocí termočlánků typu K. Bylo zjištěno, že termočlánky mírně snižují poměr signálu k šumu měření. Na vstupním konci termočlánekových

vodičů se použil nízkopásmový filtr pro minimalizaci RF signálu na vstupech zesilovače termočlánku.

3.2.1 Pulsní sekvence

Pro získání plného profilu vlhkosti vzorku byl použit tzv. multifrekvenční sken, který je založen na získávání signálu u každé vybrané sekvence vzorku. Frekvence jsou skenovány prokládaným způsobem, aby se minimalizovala doba měření. Šířka pásma cívky (cca 400 kHz) byla dostatečně velká, aby skenovala celý vzorek bez pohybu. Pro získání jednorozměrného signálu se kombinovaly NMR signály naměřené na různých frekvencích a polohách. Pro dosažení dobrého časového rozlišení, nelze úplný rozpad NMR signálu měřit v každém bodě profilu, ale pouze ve vhodně zvolených polohách.

3.2.2 Příprava vzorku

Testoval se válcový betonový vzorek o průměru 80 mm a výšce 100 mm, který byl vyvržen z většího litého bloku o rozměrech 400 x 100 x 100 mm³. Beton měl třídu pevnosti C40 s vodním součinitelem 0,5. Betonový vzorek byl přitlačen v držáku z PTFE, aby se utěsnily všechny strany s výjimkou ohřívaného povrchu (příčná rovina válce). Tímto způsobem byl transport vlhkosti omezen na jeden rozměr. Držák z PTFE se použil z důvodu absence vodíku. Hlavní nevýhodou PTFE je to, že se při teplotě vyšší jak 300 °C mohou uvolňovat toxické výpary. Pro tento účel byl použit ventilační systém pro extrakci kouře nebo výparů vznikajících během experimentu. Tok tepla byl omezen na jeden rozměr vzorku pomocí minerální vlny a zároveň bylo zabráněno zahřívání RF cívky.

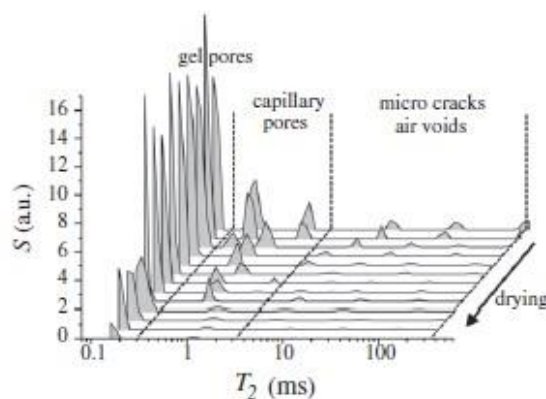
Na začátku experimentu se měřil jeden profil vlhkosti a teploty pro zaznamenávání počátečního stavu vzorku. První profil vlhkosti (homogenní obsah vlhkosti) se použil pro úpravu následných profilů pro podélnou nehomogenitu RF pole. Poté byl zapnut ohřev a vlhkost se měřila v intervalech 2 minut v závislosti na počtu průměrů potřebných k dosažení uspokojivého poměru signál/šum.

3.2.3 Charakteristika betonu během experimentu

Veškerá voda v betonu, volně nebo chemicky vázaná, přispěje nějakým podílem k NMR signálu. Nicméně široká škála pohybů molekul vody je v betonu, což vede k velkému množství relaxačních časů. Doba relaxace chemicky vázané vody v betonu je asi 20 μs. Signální rozklad volné vody uvnitř betonu se pohybuje v rozmezí od 100 μs do 40 ms. Rozpad NMR signálu, který byl získán z nasyceného betonu, obsahoval široký rozsah relaxačních časů T₂ odpovídajícím různým systémům pórů. Sekvence je vyjádřena následující rovnicí.

$$S(t) = \sum A_i \exp\left(-\frac{t}{T_{2,i}}\right) \quad (23)$$

kde A_i je amplituda příspěvku subsystému pórů: chemicky vázaná voda, gelové póry, kapilární póry a praskliny / vzduch/prázdné prostory.

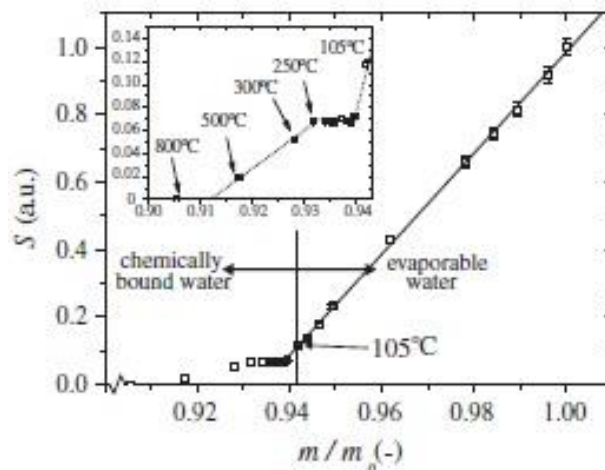


obr. 21 Charakterizace betonového vzorku pomocí NMR s různým obsahem vlhkosti – rozložení relaxačního času získaného během sušení nasyceného betonu. Signální rozpady byly měřeny za použití Ostroff-Waughovy sekvence (obrázek převzat z [8])

Na obr. 21 je znázorněno rozložení relaxačního času pro beton, který byl použit v experimentech. Horní křivka odpovídá kapilárně nasycenému betonu. Oblasti různých složek jsou vyznačeny přerušovanou čarou. Tři hlavní přínosy signálu jsou voda v gelu, kapilární póry a vzduchové dutiny nebo mikrotrhliny. Šipka označuje směr sušení. Z grafu lze vidět, že gelové póry jsou dominantní z hlediska příspěvku signálu. V nasyceném betonu přispívají kapilární póry 8 % k celkovému signálu, který klesá k nule při teplotě 105 °C.

NMR signál byl kalibrován s ohledem na celkový obsah vlhkosti v betonu. Za tímto účelem byl vzorek původně kapilárně nasycen. Hmotnostní a NMR signál je znázorněn jako funkce normalizované hmotnosti (m/m_0) na obr. 22. Kde m_0 je hmotnost vzorku kapilárně nasyceného betonu. Použila se normalizovaná hmotnost, protože tímto způsobem lze na stejné ose zobrazovat jak odpařitelnou, tak chemicky vázanou vodu. Při teplotách 105 °C byl NMR signál v čase t_e úměrný množství odpařitelné vlhkosti přítomné v betonu. To je indikováno lineárním nasazením (plná čára) NMR signálu oproti obsahu vlhkosti v rozmezí 1-0,94.

Po vysušení při konstantní teplotě 105 °C se měřil signál S (svislá osa na obr. 22). Signál musel pocházet z chemicky vázané vody v betonu. NMR signál byl rovněž kalibrován s ohledem na množství chemicky vázané vody při teplotách nad 105 °C. K tomuto účelu byl vzorek vysušen při několika teplotách až do dosažení konstantní hmotnosti. NMR signál byl měřen až poté, co byl ochlazen na pokojovou teplotu pod atmosférou 0 % RH. NMR signál se snížil pro teploty od 105 °C do 130 °C. (viz obr. 25). Snížení signálu je způsobeno poklesem vody, která je silně absorbována v pórech o velikosti jen několika nanometrů (nejmenší gelové póry), která se vaří / vypaří při teplotách až 130 °C. [8]



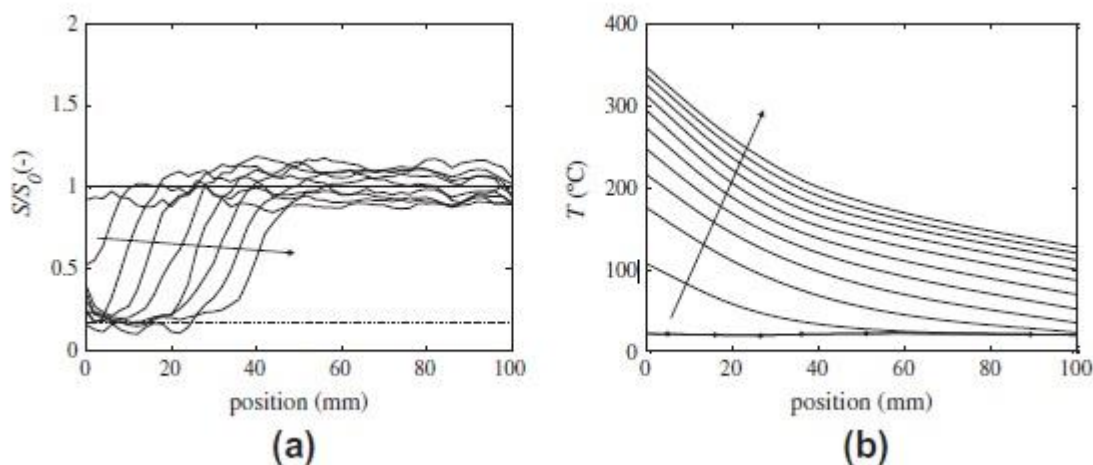
obr. 22 Charakterizace betonového vzorku pomocí NMR s různým obsahem vlhkosti – kalibrace NMR signálu s ohledem na množství vlhkosti přítomné v betonu. NMR signál vyneseno v závislosti na normalizované hmotnosti m/m_0 . (obrázek převzat z [8])

3.3 Neizotermní NMR

Při jednostranném ohřevu se teplota zvyšuje nad 100 °C a ve vzorku jsou přítomny velké teplotní gradienty. Signál z NMR musel být tedy upraven tak, aby byl získán kvantitativní obsah vlhkosti.

Konkrétní vzorek používaný v experimentu byl ekvilibrován při relativní vlhkosti 97 %, což odpovídá obsahu vlhkosti 0,07. Vzorek se zahřívá s tepelným tokem 12 kW/m². Naměřené signály a teplotní profily jsou znázorněny na obr. 23. Na tomto obrázku je vyhříváný povrch umístěn na 0 mm a zadní část vzorku je 100 mm.

V oblasti blízké povrchu (0-30 mm) signál neklesá na nulu a kontrola pozadí s prázdnou cívkou neodhalila žádný signál. Teplota v této oblasti je 250-350 °C. Proto tento signál musí pocházet z chemicky vázané vody v cementové pastě (viz obr. 22). Po 20 minutách je teplota na povrchu 200 °C, zatímco zadní část vzorku je stále na 20 °C.



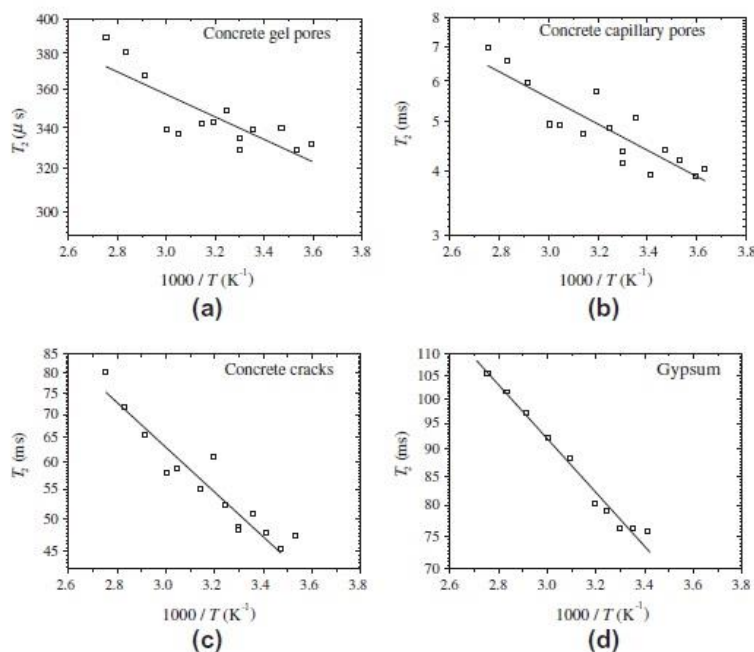
obr. 23 (a) profily neřízeného signálu (S) v závislosti na poloze uvnitř betonu. (b) Časový vývoj teplotních profilů, polohy termočlánků jsou označeny černými tečkami. (obrázek převzat z [8])

3.3.1 Teplotní úprava

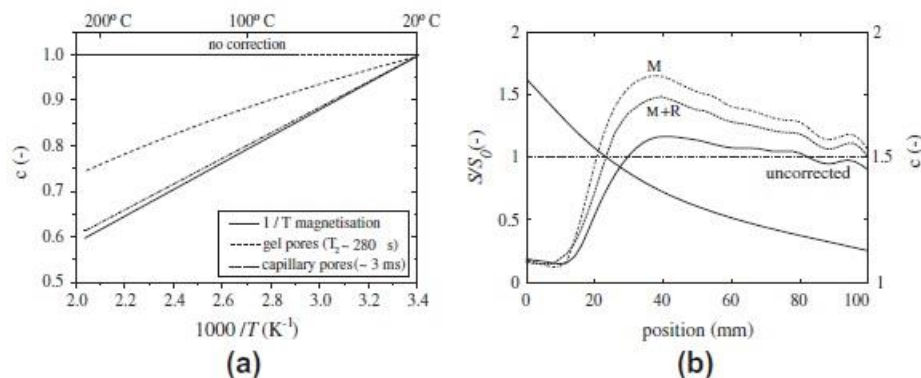
Při rozpadu signálu NMR získaného z nasyceného betonu podle rovnice (1) může být zavedena teplotní závislost: [8]

$$S(t, T) = \sum A_i(T) \exp\left(-\frac{t}{T_{2,i}(T)}\right) \quad (24)$$

V betonu existují tři dominantní příspěvky na relaxační čas. Teplotní závislost těchto relaxačních časů je znázorněna na obr. 24 pomocí tzv. Arrheniusových grafů.



obr. 24 Arrheniusovy grafy spočívají v příčné relaxační době. a) relaxační doby vody v gelových pórech, b) kapilární póry, c) betonové trhliny a d) sádra. Pevné čáry jsou záchvaty přímky k datům. (obrázek převzat z [5])

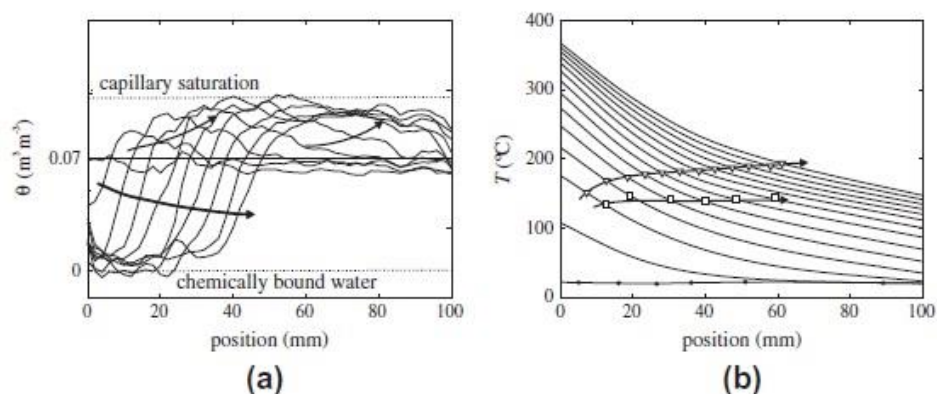


obr. 25 (a) První tři příspěvky k celkové korekci teploty jako funkce teploty. Faktor korekce teploty pro nukleární magnetizaci ($1/T$, pevná čára). Extra příspěvek povrchové relaxace pro betonové póry (přerušovaná čára). Zvláštní příspěvek kapilárních pórů (čárkovaná čára). (b) Opravy aplikované na surový signálový profil v betonu po 42 minutách (plná čára). Signální profil, který je korigován pro teplotní závislost magnetizace, je označen M.

Profil vlhkosti, který koriguje teplotní závislost magnetizace i relaxace, je indikován $M + R$. Celkový korekční faktor je znázorněn tučnou křivkou. (převzato z [8])

Na obr. 25 (b) lze vidět nekorigovaný profil signálu (plná čára), korigovanou magnetizace (M , přerušovaná čára) a celková oprava ($M+R$, přerušovaná čára). Korekce magnetizace zvyšuje naměřený signál v poloze 40 mm od 1,1 do 1,6. Přestože je teplota a tím i korekce vyšší než povrch, není žádná významná změna profilu vlhkosti po korekci (korekce je vyznačena tučnou křivkou na obr. 25 a)) Přerušovaná čára ukazuje výsledek po magnetizaci i relaxační korekci. Víceméně homogenní profil signálu od 40 do 100 mm vykazuje zřetelný vrchol při 40 mm po korekci. [8]

Kompletní sada korigovaných profilů signálu je zobrazena na obr. 26. Na obrázku lze vidět korigované profily (a), tak i měřené teplotní profily (b).



obr. 26 (a) Opravené profily vlhkosti a (b) teplotní profily. Jak teplota rychle stoupá na více než $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, dochází k rozvoji varu.). Přerušovaná čára označuje izotermii $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při postupujícím postupu varu se vyvíjí vrchol vlhkosti. Tento vrchol se zvyšuje a dosáhne saturace po 30 minutách. Teploty na vrcholu vlhkosti jsou uvedeny v teplotních profilech (h). Teplota na povrchu se zvyšuje na přibližně $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Profily jsou zobrazovány každých 8,5 min. Šipky na obrázcích ukazují pokrok v čase. [8]

3.4 Závěr

Nukleární magnetická rezonance umožňuje měření neizotermního transportu vlhkosti uvnitř stavebních materiálů. Lze použít realistické teplotní gradienty, které napodobují tok ohně. Až dosud byla existence vlhkostního vrcholu a vývoje nasyceného regionu předpovězena pouze modely. Toto měření je prvním přímým kvantitativním důkazem pro tento proces. Jak je popsáno výše, měření teplot je v tomto neizotermním experimentu zásadní, neboť poskytují správnou korekci potřebnou k získání přesných kvantitativních profilů vlhkosti. Je třeba poznamenat, že správný korekční faktor může být rozdílný u různých porézních materiálů. Proto je pro každý porézní materiál zapotřebí kalibrace NMR signálu s teplotou.

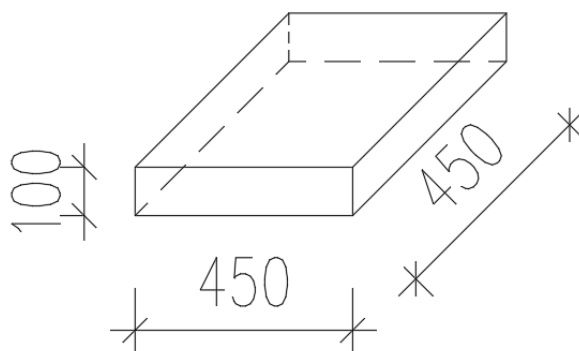
4 Praktická část

4.1 Návrh experimentu

Praktickou část této práce tvoří experiment zaměřený na měření vlhkosti a transportu tepla uvnitř betonových vzorků při jednostranném ohřívání. Vzorek byl současně po celou dobu experimentu vážen. Experiment byl proveden na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Celkem se zkoušely dva betonové vzorky o rozměrech 450 x 450 x 100 mm. Tyto vzorky byly vystaveny tepelnému záření z plynového infrazářiče KASPO K30 STL [15]. Rozměry plynového zářiče odpovídaly zhruba rozměrům betonových vzorků, a to z důvodu, aby nedocházelo k velkému uvolňování tepla do okolí. Teplota uvnitř vzorků se měřila pomocí termočlánků, které v nich byly předem umístěné. Za účelem zjišťování vlhkosti uvnitř vzorků se do každého vzorku již při betonáži vložila měřící pouzdra Hygropin o průměru 8 mm. Samotný experiment jsme za doprovodu vedoucího mé práce pana Ing. Radka Štefana, provedli já a můj kolega Bc. Jan Havlůj, který se zaměřuje právě na měření teploty uvnitř betonových vzorků pomocí termočlánků a na jejich fixaci.

4.2 Charakteristika vzorků a rozmístění termočlánků

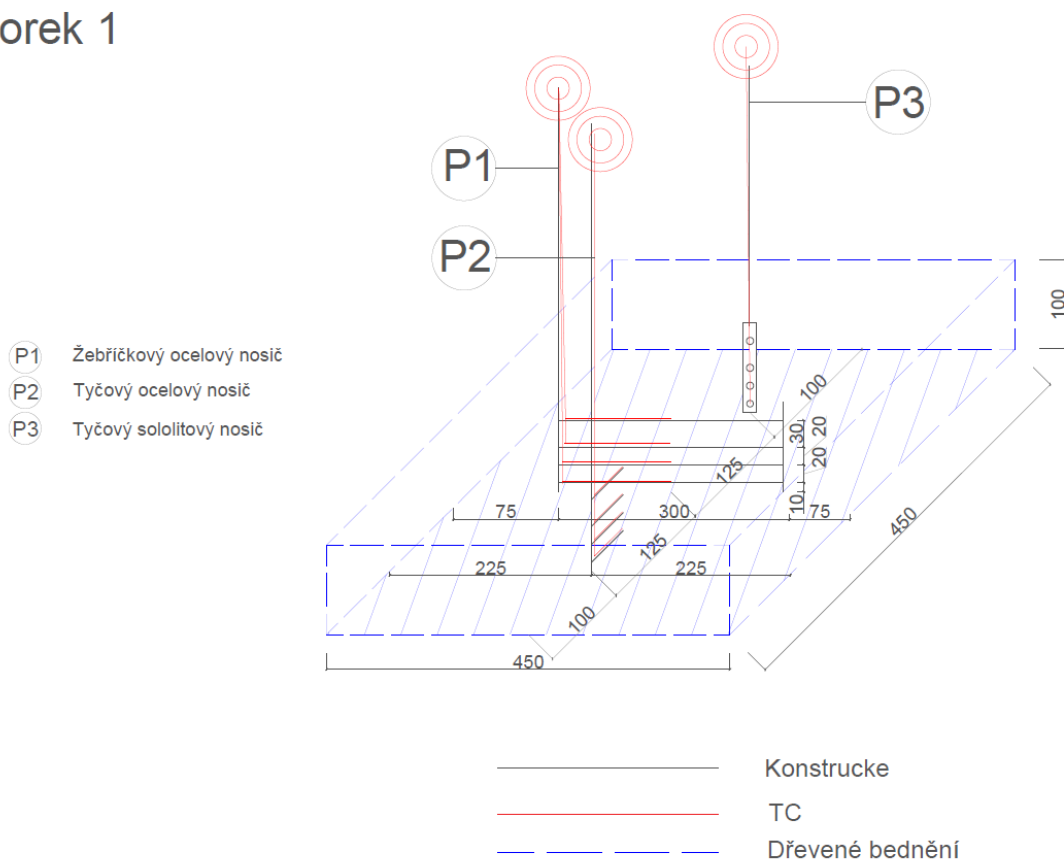
Celkem proběhla betonáž dvou stejných vzorků. Oba vzorky byly betonové o rozměrech 450 x 450 x 100 mm a váze zhruba 50 kg. Na jejich výrobu byl použit prostý beton třídy C30/37. Betonové vzorky byly vyhotoveny do dřevěného bednění.



obr. 27 Rozměry betonového vzorku

V prvním vzorku je rozmístěno celkem 14 termočlánků, které jsou uchyceny v různých hloubkách měření a to konkrétně v: 1 cm, 3 cm, 5 cm a 8 cm. Jako fixační zařízení jsou použity celkem tři typy (označení P1, P2 a P3), jejich rozmístění je na obr. 28. Další dva termočlánky pro měření povrchové teploty jsou umístěny na straně exponované a neexponované. Fixátor P1 je umístěn uprostřed vzorku, fixátory P2 a P3 jsou rozmístěny tak, aby jejich termočlánky byly opět na ose vzorku, avšak jsou posunuty do stran a odsazeny o 12,5 cm od středového žebříkového nosiče. Všechny tři vzorky mají vyvedenou dlouhou vodící kulatinu přibližně 50 cm nad neexponovanou část vzorku, aby zde byl možný vývod kabelového vedení pro termočlánky. Fixátor P2 je tyčový ocelový nosič a má vyrobené výztuhy mimo svou osu do vzdálenosti 5 cm. Třetí tyčový sololitový nosič je umístěn 12,5 cm od žebříkového nosiče a 10 cm od kraje bedněni.

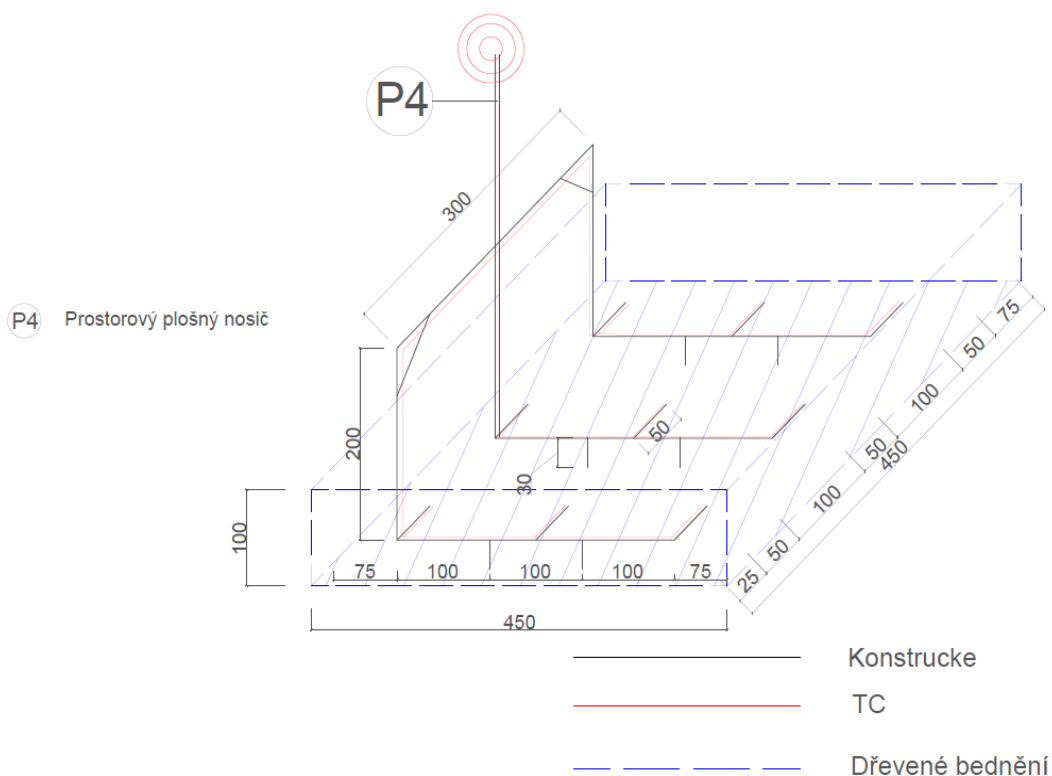
Vzorek 1



obr. 28 Rozmístění termočlánků v prvním vzorku (obrázek převzat z [16])

Ve druhém vzorku se nachází celkem 11 termočlánků, které se oproti prvnímu vzorku liší v hloubce fixace. Všechny tyto termočlánky jsou umístěny ve stejné hloubce a slouží tedy pro plošné měření teploty vzorku. Jako fixátor je použit plošný nosič, který je vyveden až nad betonovou část, z důvodu, aby v betonové části bylo co nejméně materiálu, který by mohl negativně přispívat k vedení teplot a znehodnocovat zkoušku. Další dva termočlánky pro měření povrchové teploty byly opět osazeny na povrchu exponované a neexponované strany. Rozmístění fixátoru je takové, aby prostřední termočlánek směřoval přímo proti ose středu plochy čtverce exponovaného povrchu. Tím, že je konstrukce zpevněna a propojena dohromady, bylo jednodušší ji umístit právě doprostřed, dle rozměrových hodnot bude prostorový plošný nosič vložen do formy a odsazen 7,5 cm od třech stran, přičemž u čtvrté to bude pouze o 2,5 cm, důvodem jsou jednotlivá žebírka pro vývod termočlánků, jejichž délka je vždy 5 cm, dle požadavku normy. Celá konstrukce má vývod uprostřed, odkud se sbíhají všechny 3 měřící ramena po třech termočláncích a tudy je pak nahoru vedena kabeláž termočlánků.

Vzorek 2



obr. 29 Rozmístění termočlánků ve druhém vzorku (obrázek převzat z [16])

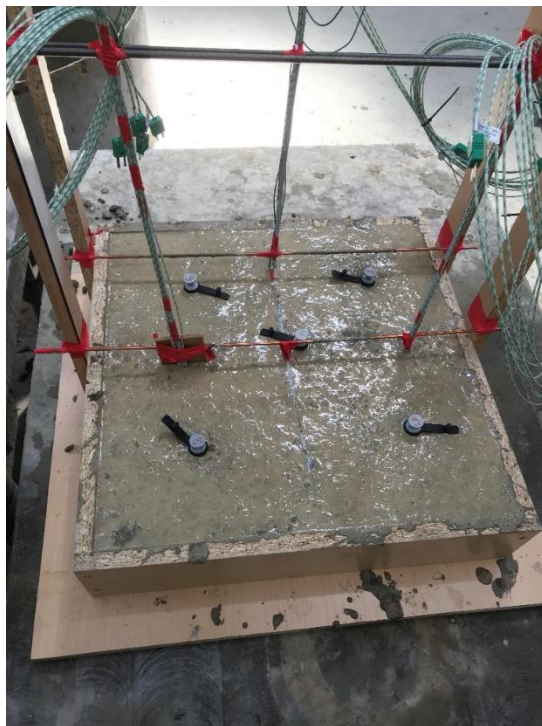
4.3 Termočlánky a jejich specifikace

Pro měření teploty jednotlivých prvků byly použity kabelové termočlánky MTC 12 typu K, které mají rozsah teplot od -200 až do 1200 °C. Použitý druh izolace termočlánku byl GHGH oval 2x0,5 mm. Zakončení termočlánku bylo bez keramického korálku a s miniaturním vysokoteplotním konektorem MTC-MM-K.

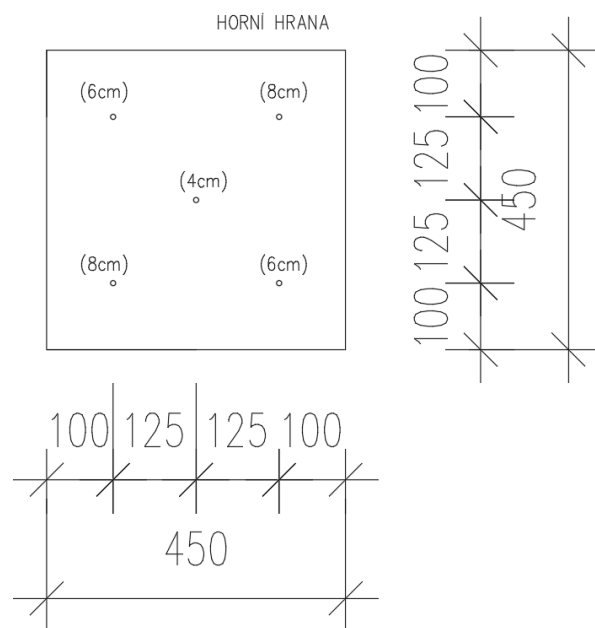
Tyto termočlánky byly přichyceny na předem připravené nosiče, které zaručily přesnost umístění jednotlivých termočlánků v prvcích. Nosiče pro naše vzorky jsou umístěny vždy v hloubce 1 cm, 3 cm, 5 cm, 8 cm od exponovaného povrchu desky. Počet termočlánků ve vzorku číslo 1 je 14 v druhém vzorku bylo použito 11 termočlánků - 9 pro měření plošné teploty v hloubce 3 cm a 2 termočlánky pro oba povrchy [16]

4.4 Rozmístění měřících pouzder Hygropin

Pro měření relativní vlhkosti uvnitř betonových vzorků byla již při betonáži do vzorků vložena plastová měřící pouzdra. Celkem deset, po pěti v každém vzorku. Byla zasunuta do různých hloubek. Rozmístění pouzder a jednotlivé hloubky (číslo v závorce) je na obr. 30 a obr. 31. Umístění bylo v obou vzorcích stejné, z důvodu porovnání vlhkosti obou vzorků. Měřící pouzdra byla umístěna na neexponované straně a sloužila pro sondy, které se do nich vkládaly za účelem zjišťování relativní vlhkosti. V závislosti na nastavení sonda ukazovala datum, čas, vlhkost v betonu, relativní vlhkost i teplotu.



obr. 30 Rozmístění měřících pouzder ve vzorku

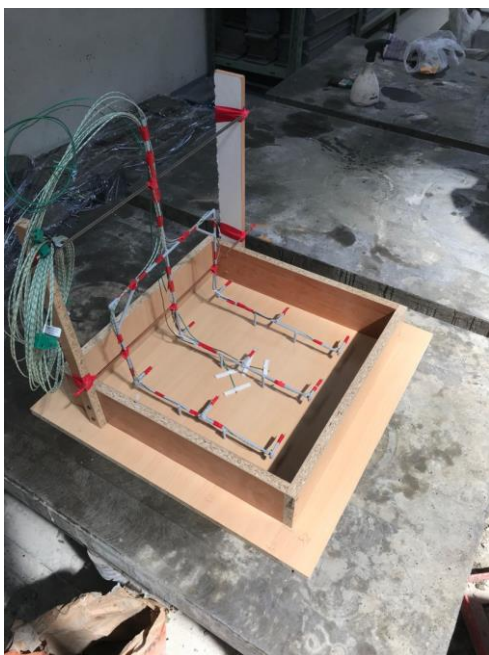


obr. 31 Půdorysné rozmístění pouzder

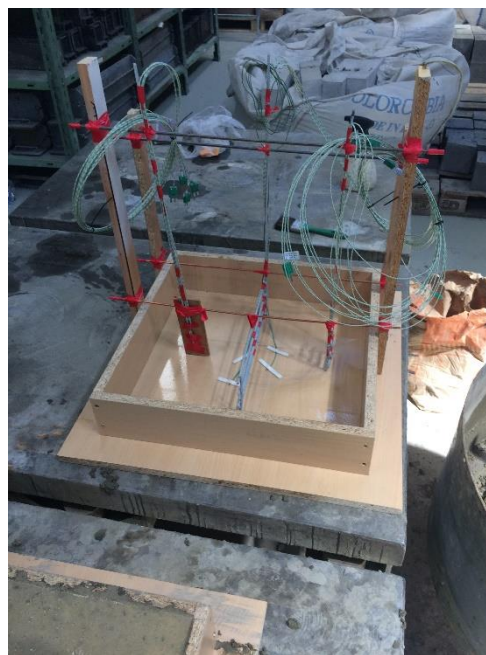
4.5 Příprava vzorků

Samotná příprava a betonáž vzorků probíhala ve dne 22. května 2018 v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze a podíleli se na ní celkem čtyři lidi. Vedoucí mé práce pan Ing. Radek Štefan, Ph.D., dále pan Ing. Josef Novák, Ph.D. a autoři tohoto experimentu, já (Bc. Daniel Rajman) a můj kolega Bc. Jan Havlůj.

Příprava začala s bedněním, které se nejdříve muselo připravit pro betonáž, konkrétně se vytvořila podpůrná konstrukce pro jednotlivé fixátory, na kterých jsou umístěné jednotlivé termočlánky, viz obr. 32 a obr. 33.



obr. 32 Fixátor u vzorku č.1



obr. 33 Fixátor u vzorku č.2

Po vytvoření konstrukcí nesoucí jednotlivé fixátory se připravila plastová pouzdra pro měření vlhkosti uvnitř vzorků. Pouzdra byla zkrácena na navrhované délky a připravena na umístění do vzorků. Připravená pouzdra jsou na obr. 34.



obr. 34 Pouzdra pro měření vlhkosti

Poté se začala připravovat betonová směs, ke které bylo zapotřebí celkem sedm složek. A to: cement, voda, hrubé kamenivo frakce 8-16 mm, jemné kamenivo frakce 4-8 mm, písek frakce 0-4 mm, plastifikátor a vlákna. Konkrétní složení jednotlivých složek viz tab. 3

tab. 3 Složení betonu použitého v experimentu (Radek Štefan, 2018)

Složka	Popis
Cement	Cement 42,5 R
Voda	Voda
$\frac{v}{c} = 0,49$	Vodní součinitel
Hrubé kamenivo	Frakce 8-16 mm
Jemné kamenivo	Frakce 4-8 mm
Písek	Frakce 0-4 mm
Plastifikátor	Statechement 2180
Vlákna	Krampe Harex

Jednotlivé složky pro přípravu betonové směsi jsou zobrazeny na obr. 35 a na obr. 36.



obr. 35 Složky betonu



obr. 36 Plastifikátor

Po připravení složek následovalo jejich smíchání v míchačce, viz. obr. 37 a obr. 38. V první řadě se vsypalo hrubé kamenivo, poté jemné kamenivo a písek. Následovalo první promíchání. Při dalším promíchávání se horním otvorem v míchačce přilévala voda, ve které byl přimíchán plastifikátor, a také se vsypala vlákna. Po řádném promíchání v míchačce se mohl začít beton ukládat do připravených bednění.



obr. 37 Složky v míchačce



obr. 38 Horní otvor míchačky

Ukládání betonu do forem muselo být pečlivé, jelikož bylo potřeba dávat pozor na předem přichystané a upevněné termočlánky. Bednění vzorků bylo umístěno na vibračních stolech, které

se v průběhu několikrát použily, z důvodu velmi tuhé konzistence betonu. Ukládání betonové směsi do forem je zobrazeno na obr. 39 a obr. 40.

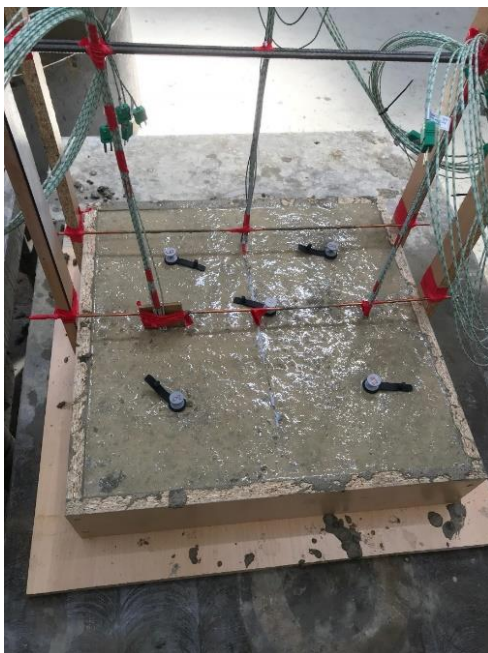


obr. 39 Betonáž vzorků



obr. 40 Betonáž vzorků

Po vybetonování jednotlivých vzorků, se do každého z nich vložila měřící pouzdra Hygropin. Umístění odpovídá návrhu a lze jej vidět na obr. 41 a na obr. 42.



obr. 41 Rozmístění ve vzorku č.1



obr. 42 Rozmístění ve vzorku č.2

Vybetonované vzorky byly následně uskladněny v areálu Fakulty stavební ČVUT v Praze, konkrétně v jedné z laboratoří až do doby uskutečnění experimentu, viz obr. 43.



obr. 43 Umístění vzorků v laboratoři

5 Experiment

5.1 Obecné informace

Datum: 25.10.2018

Místo konání: dvůr za budovou D fakulta stavební ČVUT v Praze

Čas zahájení: 10:00

Čas ukončení: 15:30

5.2 Příprava

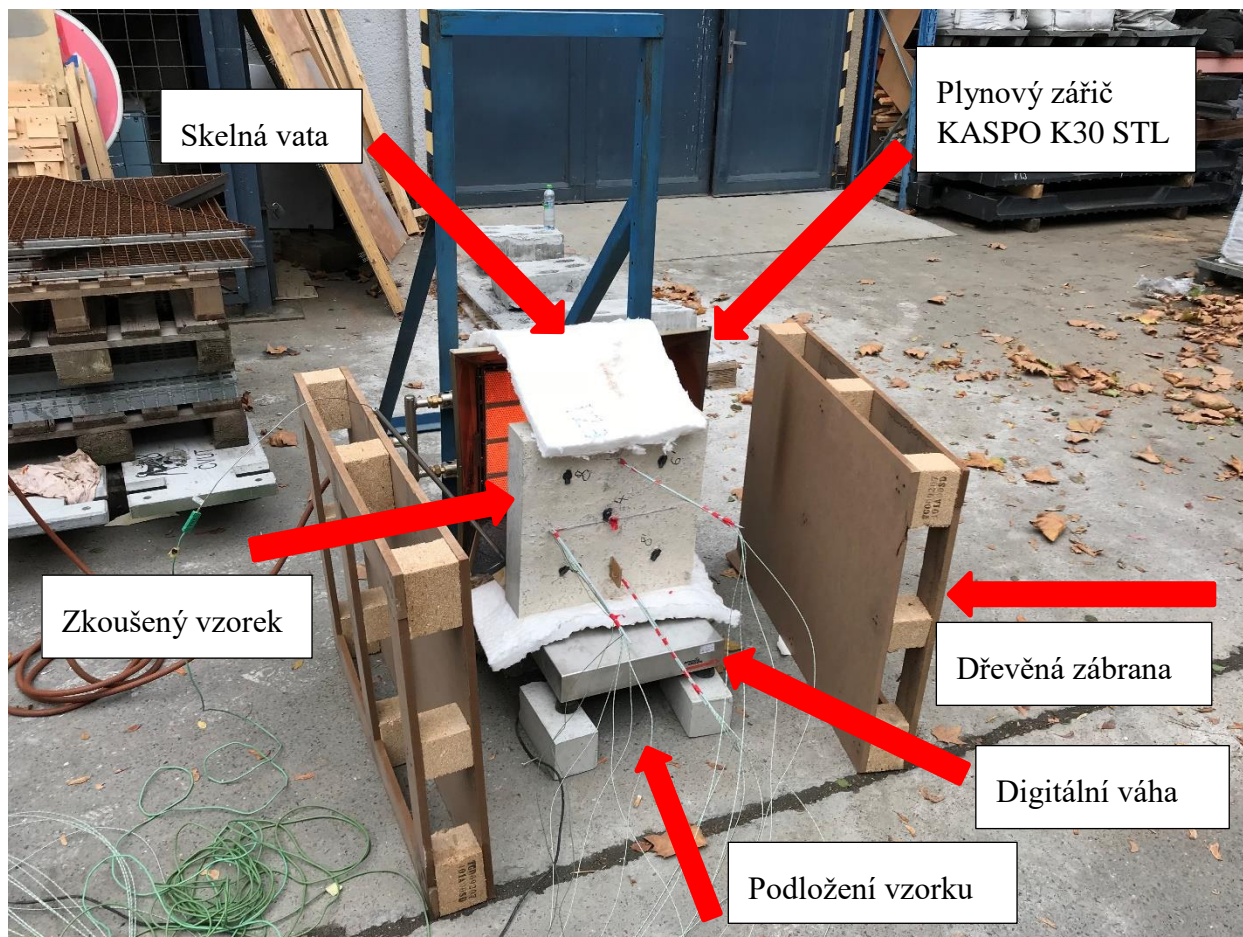
Příprava experimentu začala v 9 hodin ráno, kdy se naposledy před zahříváním změřila relativní vlhkost vzorků v laboratoři. Jelikož se vlhkost značně ustálila, tak její měření nezabralo tolik času. Poslední měření RH vzorků před experimentem je zobrazeno na obr. 44.



obr. 44 Měření RH vzorků před experimentem

Prvním krokem bylo vnošení potřebných věcí k experimentu na místo zkoušení, tedy nosné konstrukce, na které byl zavěšený plynový zářič KASPO K30 STL o výkonu 30 kW, dále plynové láhve s obsahem 10 kg stlačeného plynu, digitální váhy a v neposlední řadě zkušebních vzorků.

Ve druhém kroku se začalo připravovat místo zkoušení. První zkušební vzorek se postavil před nosnou konstrukci s plynovým zářičem do vzdálenosti zhruba 10 cm, aby nedocházelo k velkým tepelným ztrátám do okolí. Vzorek zároveň stál na digitální váze, která byla zcela odizolovaná pomocí skelné vaty. Z boků betonového vzorku se postavily dřevěné zábrany. Připravené stanoviště lze vidět na obr. 45



obr. 45 Uspořádání experimentu

Dále následovalo připojení termočlánků k dataloggeru, kde měl každý svoje číslo. Uvedená čísla byla důležitá pro vyhodnocení experimentu, aby bylo zřejmé, na jakém místě daný termočlánek byl. Údaje z termočlánků se v dataloggeru zobrazovaly po 20 s po celou dobu experimentu. Ještě před zapálením plynového hořáku se vzorek zvážil. Jeho počáteční hmotnost byla 46,774 kg. Hmotnosti vzorku byly zaznamenávány v pěti minutových intervalech.

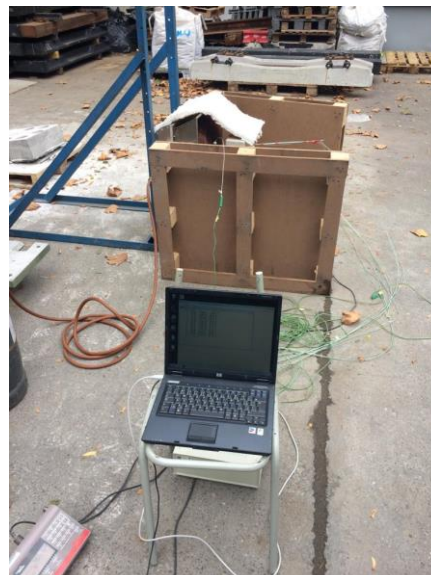
5.3 Zahájení experimentu

Příprava experimentu trvala poměrně dlouho, a tak hořák vzplanul až těsně po půl dvanácté. Jeho zapálení proběhlo bez problémů a údaje z dataloggeru začaly ukazovat první zvýšení teploty v některých z termočlánků. Tlak na plynové láhvi se udržoval na hodnotě 1 bar. Hmotnost vzorku byla zároveň ovlivňována větrem, ovšem jenom sporadicky. Bohužel od vize měření vlhkosti uvnitř pouzder, která byly umístěny ve vzorcích, se muselo rychle upustit, jelikož přístroj pro měření vlhkosti je navrhován pouze do teplot 80 °C, přičemž již zhruba po 5 minutách zahřívání vzorku ukazovala teplota některých termočlánků vysoce nad 100 °C. Průběh zahřívání prvního vzorku je zobrazen na obr. 46 a kontrolní stanoviště pro zaznamenávání údajů z dataloggeru na obr. 47.

Zahřívání prvního vzorku se přerušilo po 105 minutách, z důvodu vyprázdnění plynové láhve, která již nedokázala vyprodukovat tlak 1 bar. Po vypnutí plynového zářiče se musel nechat vzorek vychladnout a stále se pomocí dataloggeru měřil pokles teplot.



obr. 46 Zahřívání vzorku



obr. 47 Zaznamenávání teplot

Po vychladnutí vzorku došlo k jeho přemístění a mohl se začít zahřívát druhý vzorek. Zároveň se vyměnila plynová láhev, aby mohl být opět zaručený tlak 1 bar.

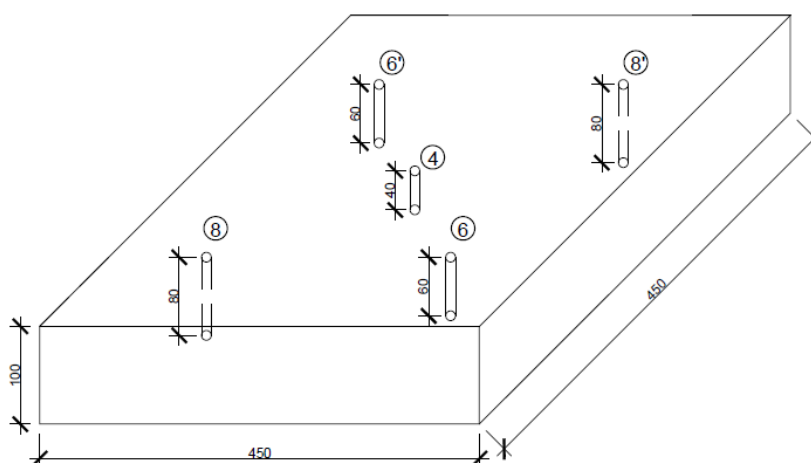
Druhý vzorek se zahříval zhruba 70 minut. Důvodem bylo nečekané vzplanutí kolem plynového zářiče a experiment musel být tedy ukončený předčasně. Během zahřívání druhého vzorku bylo dosaženo maximálních teplot 400 °C.

5.4 Vyhodnocení experimentu

V obou případech zahřívání nedošlo k poškození plastových pouzder pro měření relativní vlhkosti uvnitř vzorků, a tedy mohla být změřena vlhkost po experimentu a porovnána s vlhkostí před začátkem zahřívání.

5.4.1 Měření relativní vlhkosti před zahříváním vzorků

Po dobu uskladnění vzorků byla zaznamenávána jejich relativní vlhkost v měsíčních intervalech až po dobu uskutečnění experimentu. RH se měřila pomocí přístroje Proceq Hygropin. Změřené vlhkosti v daných měsících jsou uvedeny v tabulkách níže. Každé měření v daném měsíci se lišilo délkou ustálení relativní vlhkosti uvnitř pouzder. Čím delší dobu beton zrál, tím kratší doba pro ustálení vlhkosti byla zapotřebí. Při prvním měření RH v srpnu se vlhkost uvnitř pouzder ustálila zhruba po dvaceti minutách. Při posledním měření před experimentem relativní vlhkost dosáhla konstantní hodnoty po pěti minutách. Na obr. 48 je vidět rozmístění jednotlivých pouzder podle hloubky uložení. Rozmístění je u obou vzorků stejné.



obr. 48 Rozmístění jednotlivých pouzder ve vzorku

První měření proběhlo 9.srpna 2018. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 4 a tab. 5.

Laboratoř ČVUT, RH = 47 %, t = 30 °C

tab. 4 Naměřené hodnoty srpen, vzorek č.1

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	67,32	27,53
6	72,40	27,46
6'	68,64	27,54
8	69,84	27,55
8'	71,33	27,33

tab. 5 Naměřené hodnoty srpen, vzorek č.2

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	70,87	27,68
6	72,04	27,75
6'	71,94	27,48
8	69,32	27,41
8'	70,12	27,5

Laboratoř ČVUT, RH = 43 %, t = 28 °C, 7.září 2018.

tab. 6 Naměřené hodnoty září, vzorek č.1

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	66,48	25,67
6	68,80	25,47
6'	64,89	25,49
8	64,74	25,55
8'	67,64	25,42

tab. 7 Naměřené hodnoty září, vzorek č.2

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	66,28	25,43
6	67,83	25,54
6'	68,05	25,36
8	65,58	25,37
8'	66,29	25,51

Laboratoř ČVUT, RH = 35 %, t = 26 °C, 3.října 2018.

tab. 8 Naměřené hodnoty 3.října, vzorek č.1

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	58,88	24,66
6	62,52	24,59
6'	57,69	24,35
8	58,78	24,39
8'	60,42	24,32

tab. 9 Naměřené hodnoty 3.října, vzorek č.2

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	58,84	25,02
6	60,05	24,67
6'	62,20	24,65
8	57,90	24,51
8'	61,31	24,58

Laboratoř ČVUT, RH = 40 %, t = 24 °C, 25.října 2018.

tab. 10 Naměřené hodnoty 25.října, vzorek č.1

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	56,49	23,75
6	60,34	23,16
6'	56,41	23,65
8	56,16	23,10
8'	58,62	22,96

tab. 11 Naměřené hodnoty 25.října, vzorek č.2

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	58,35	23,15
6	55,60	23,34
6'	60,95	22,87
8	57,55	22,88
8'	59,82	22,94

5.4.2 Měření relativní vlhkosti po experimentu

Jak už bylo zmíněno na začátku kapitoly, plastová pouzdra pro měření relativní vlhkosti uvnitř vzorků přežila zahřívání a byla tedy použita pro zjištění zbylé vlhkosti.

Laboratoř ČVUT, RH = 40 %, t = 24 °C, 1.listopadu 2018.

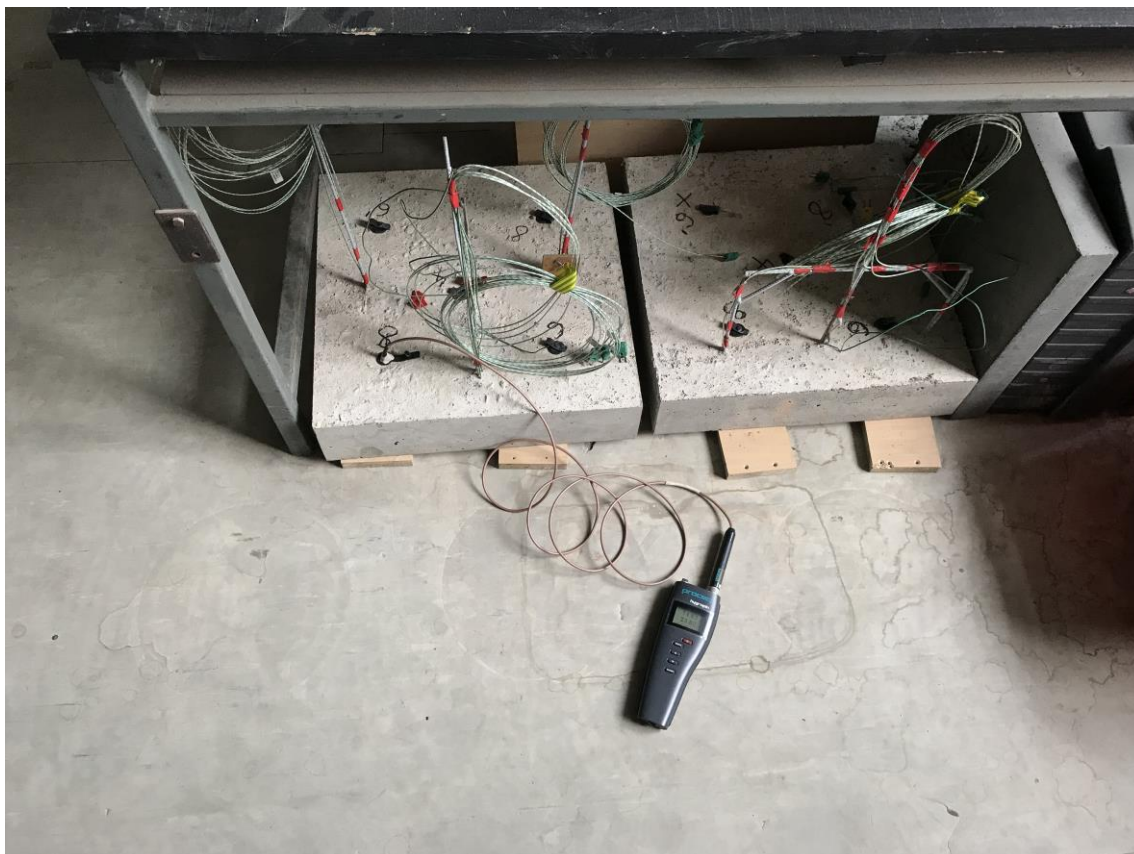
tab. 12 Naměřené hodnoty po experimentu, 1.listopadu, vzorek č.1

Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	13,24	22,70
6	14,08	22,97
6'	11,63	22,67
8	10,62	23,04
8'	10,74	22,74

tab. 13 Naměřené hodnoty po experimentu, 1.listopadu, vzorek č.2

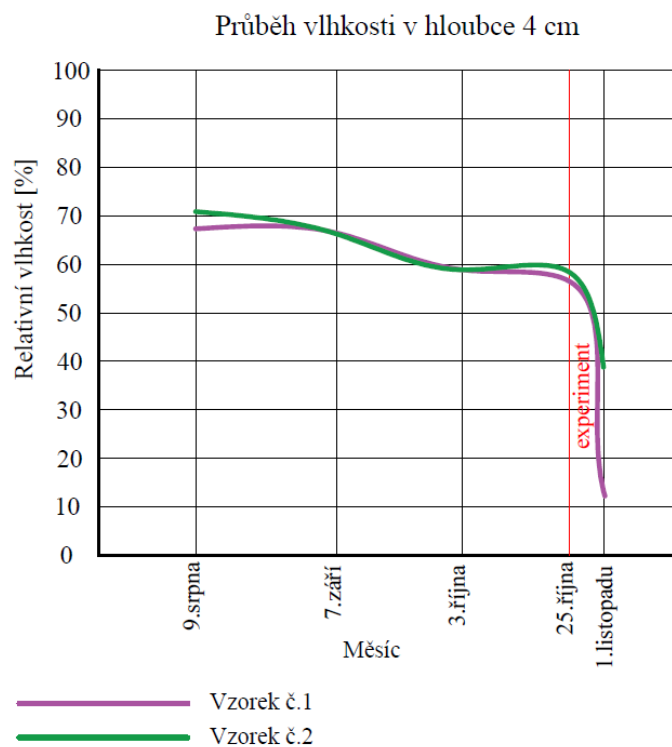
Poloha	Relativní vlhkost [%]	Teplota [°C]
4	38,82	22,47
6	50,63	22,42
6'	43,68	22,31
8	32,41	22,87
8'	24,71	22,46

Z tab. 12 a tab. 13 lze vidět značný rozdíl ve výsledné relativní vlhkosti uvnitř jednotlivých pouzder po experimentu. Vzorek č.2 byl podrobený zahřívání pouze polovinu času toho co vzorek č.1 a to způsobilo částečné udržení vlhkosti uvnitř vzorku. Na obr. 49 je vidět měření RH vzorků týden po experimentu.



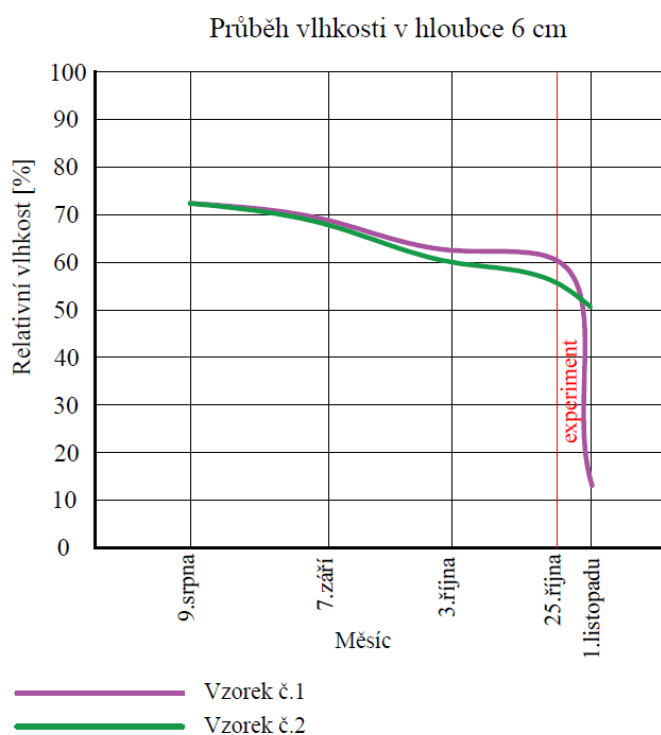
obr. 49 Měření RH vzorků po experimentu

V následujících grafech je zobrazeno porovnání relativní vlhkosti uvnitř jednotlivých vzorků podle času měření. Jak je uvedeno výše, celkem byly uskutečněny čtyři měření před ohříváním vzorků, a to konkrétně v srpnu, v září, začátkem října, v den experimentu před zahříváním a poslední měření bylo provedeno týden po experimentu.



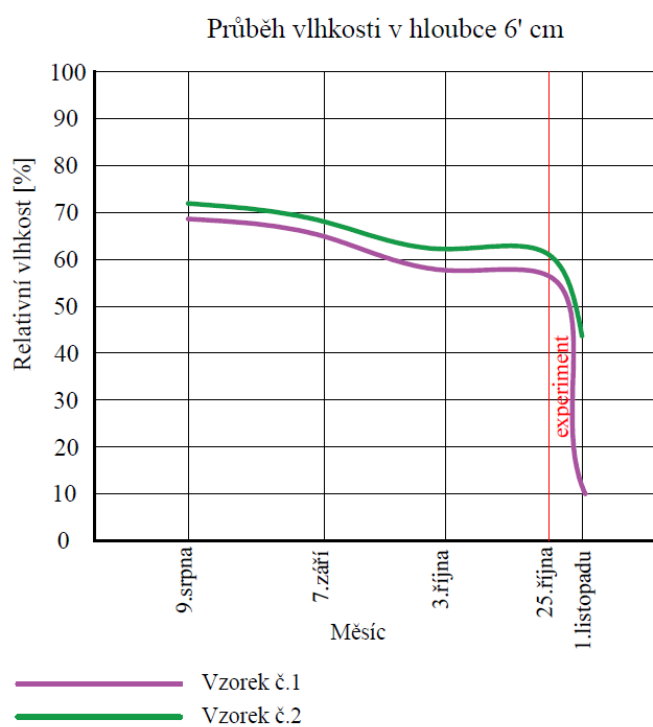
obr. 50 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 4

Na obr. 50 lze vidět průběh relativní vlhkosti v hloubce 4 cm u obou vzorků. Lze si všimnout, že vzorek postupem času vysychá, což naznačuje správně měření přístroje. K výrazným rozdílům dochází až u měření, které nastalo po zahřívání vzorku, tedy po experimentu. Poslední měřená RH u vzorku č.2 dosahovala hodnot kolem 40 %, naopak u vzorku č.1, který byl zahříván delší dobu byla RH lehce přes 10 %. Tento značný rozdíl byl zřejmě zapříčiněn právě onou délkou zahřívání. Teploty uvnitř vzorku č.2 nestihly dosáhnout takových hodnot jako u vzorku č.1 a nedošlo tedy k tak značnému úbytku vlhkosti.

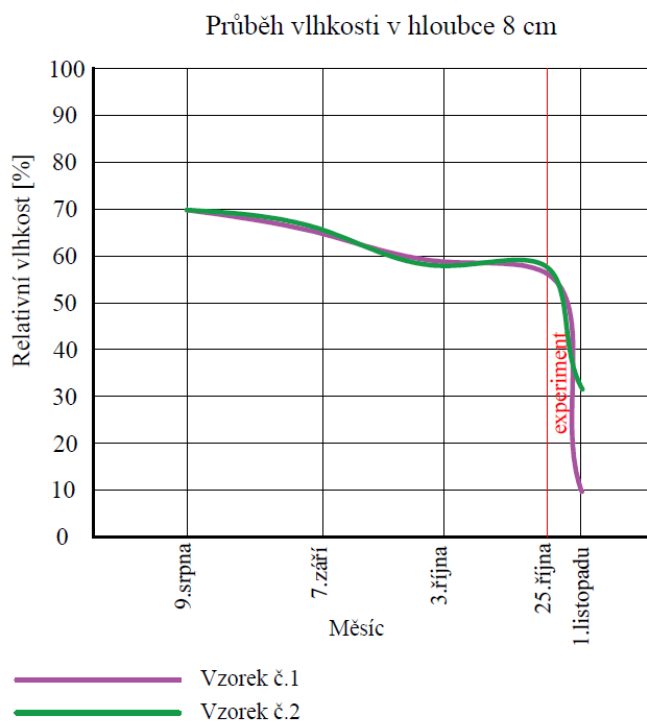


obr. 51 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 6

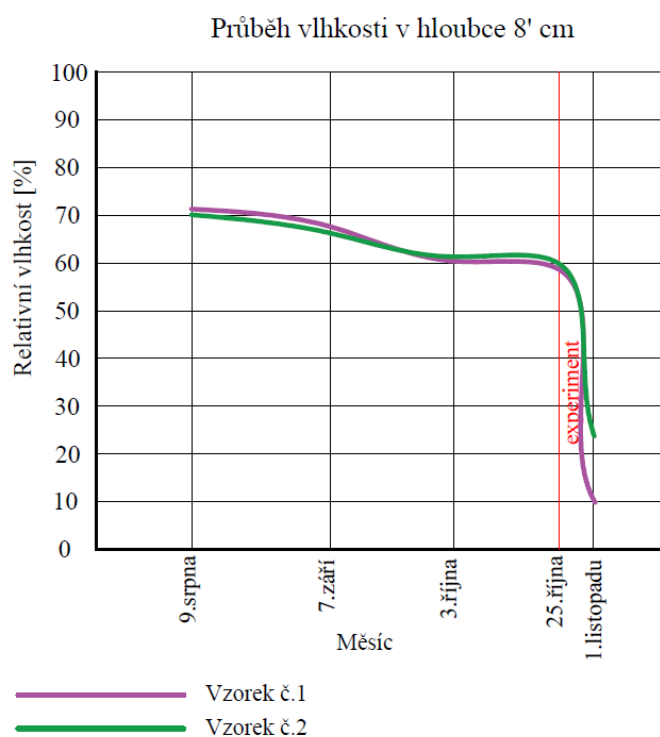
Průběh RH u pouzdra 6 je obdobný jako u předchozího. Vlhkost uvnitř obou vzorků postupně vysychá, patrného rozdílu si lze všimnout u posledního měření před začátkem experimentu, tedy 25. října a opět týden po experimentu, kdy hodnota RH u vzorku č.2 dosahovala lehce přes 50 % a RH u vzorku č.1 opět lehce přes 10 %.



obr. 52 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 6'



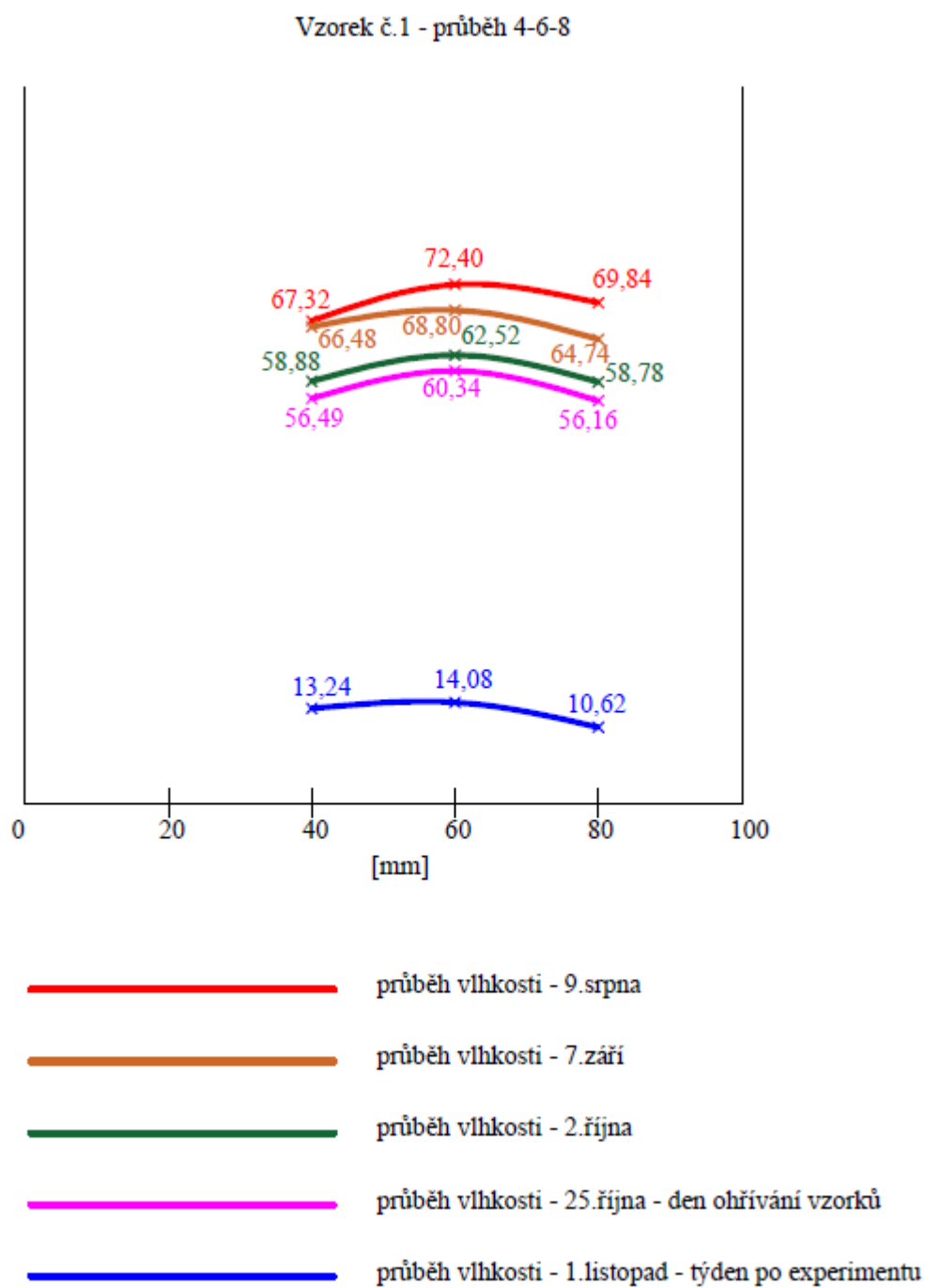
obr. 53 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 8



obr. 54 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 8'

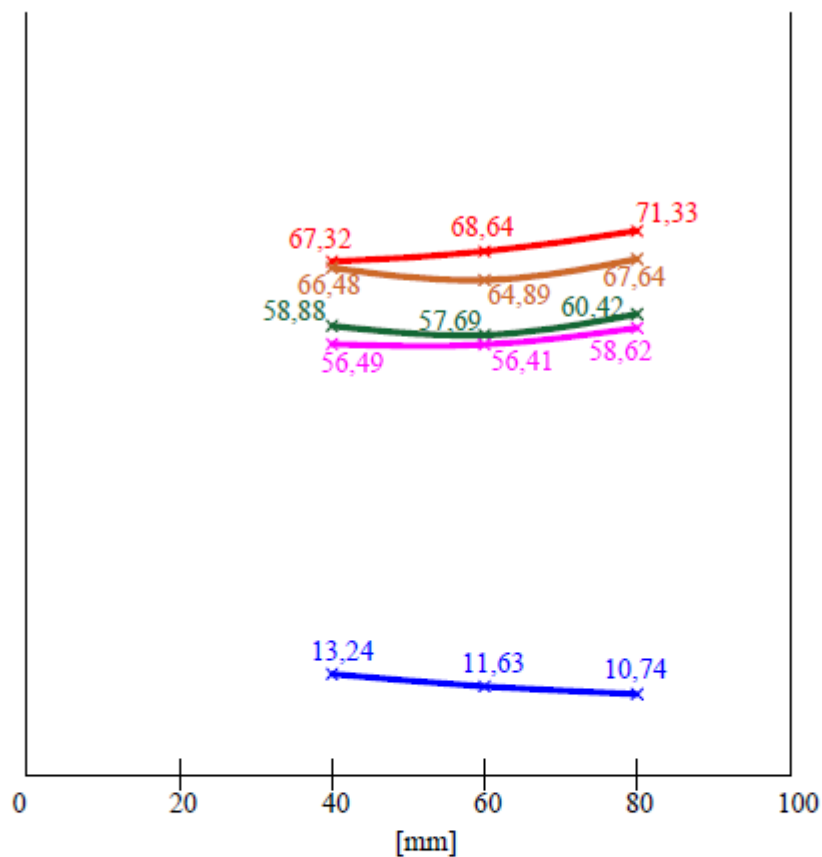
Jak už bylo zmíněno výše, z grafů lze vidět značný rozdíl v relativní vlhkosti, která byla změřena týden po experimentu. U vzorků č.1 jsou hodnoty RH mnohem menší než u vzorku č.2, což je pravděpodobně zapříčiněno délkou trvání zahřívání nebo poškozením jednotlivých plastových pouzder, které poté neukazovaly správnou hodnotu RH. U pouzdra 8' se hodnoty příliš neliší ani u měření, které bylo uskutečněno po experimentu. Lze tedy konstatovat, že pokud bychom vzorky zahřívaly stejnou dobu, tak bychom dosahovaly podobných hodnot RH.

V následujících grafech je zobrazeno prostorové rozložení relativní vlhkosti v jednotlivých pouzdrech podle času měření. Každé měření má svoje barevné rozlišení. Tmavě modrá barva značí rozložení vlhkosti po testování vzorků, tedy týden po konci experimentu, kdy byly vzorky opět uskladněny v laboratoři.

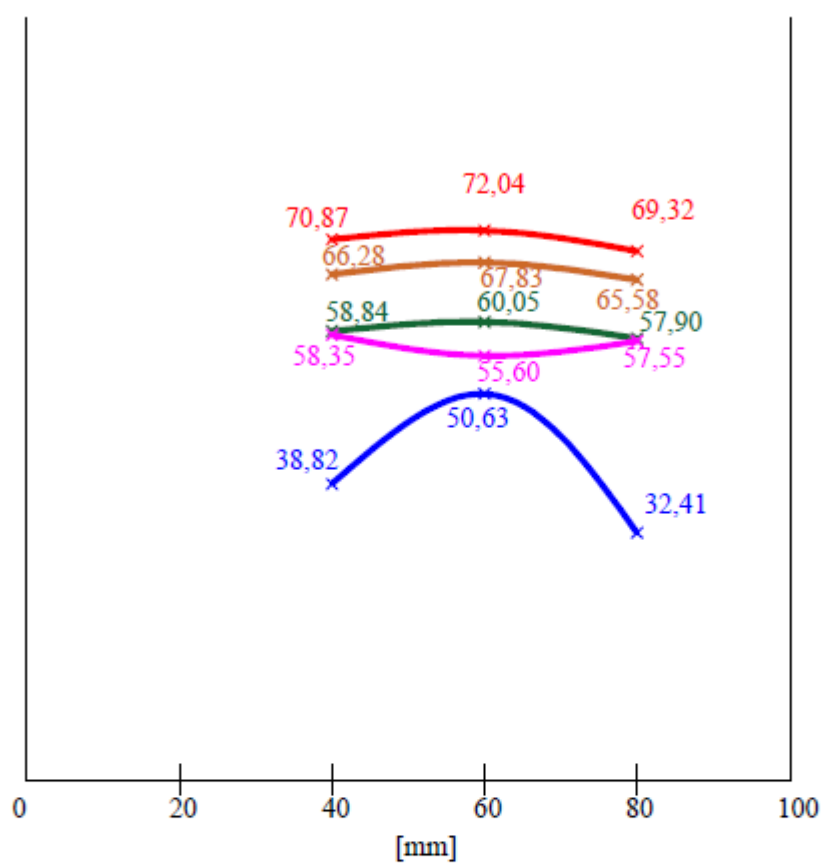


obr. 55 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.1, 4-6-8

Vzorek č.1 - průběh 4-6'-8'

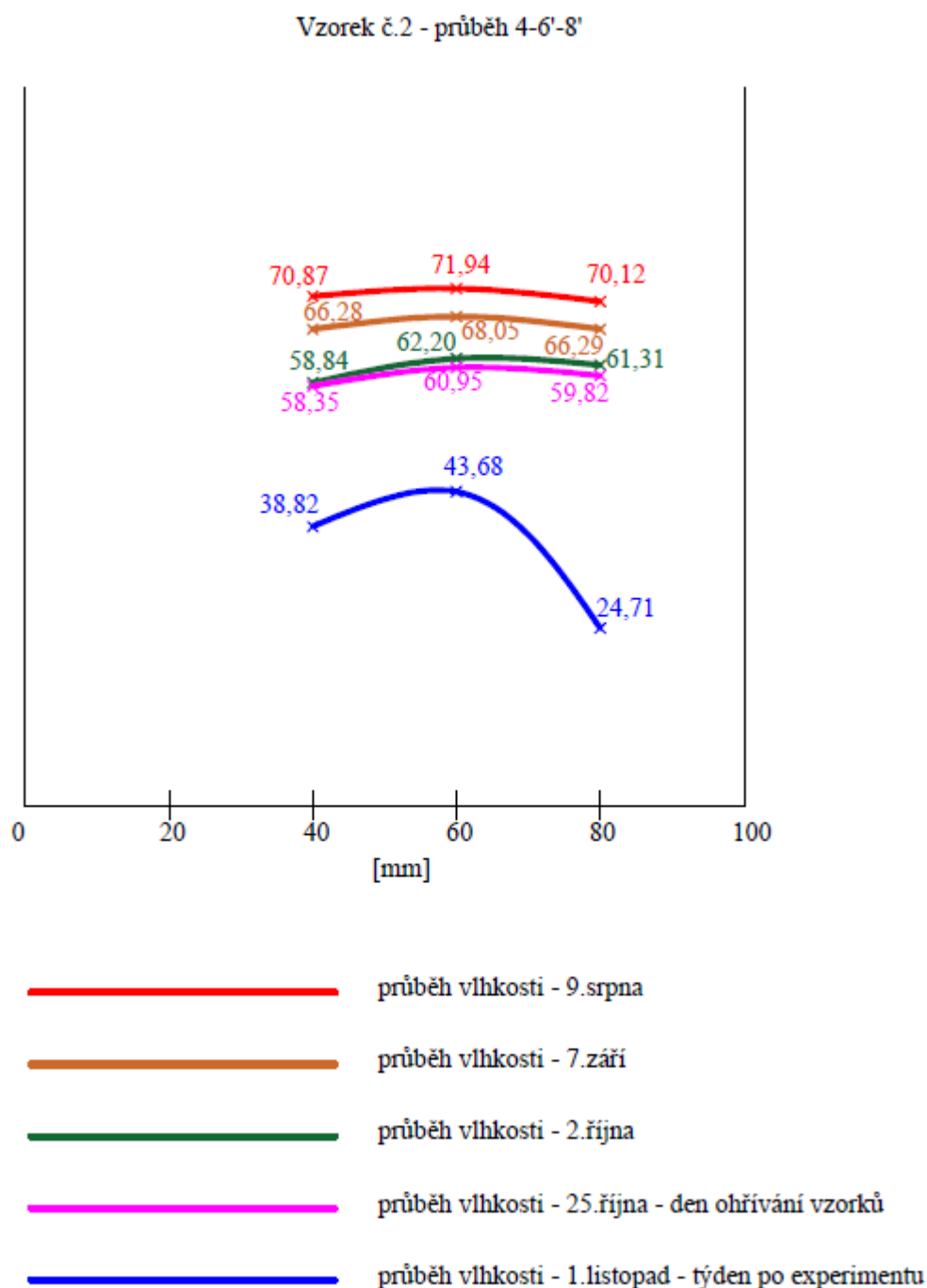
*obr. 56 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.1, 4-6'-8'*

Vzorek č.2 - průběh 4-6-8



- průběh vlhkosti - 9. srpna
- průběh vlhkosti - 7. září
- průběh vlhkosti - 2. října
- průběh vlhkosti - 25. října - den ohřívání vzorků
- průběh vlhkosti - 1. listopad - týden po experimentu

obr. 57 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.2, 4-6-8



obr. 58 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.2, 4-6'-8'

Z prostorového rozložení relativní vlhkosti vzorkem lze vidět, že se vlhkost v jednotlivých pouzdrech mění. Každé pouzdro má svojí specifickou hloubku a to ovlivňuje množství RH uvnitř betonu. Z grafů lze vyčíst, že pouzdro s označením 8, resp. 8' vykazuje ve většině případů nejmenší procento RH, což je ovlivněno právě tím, že se nachází nejbližší vzduchu, který obklopuje

betonový vzorek a tedy vysychá nejrychleji. Naopak největší koncentrace relativní vlhkosti se nachází v pouzdře umístěném v hloubce 6 cm.

5.4.3 Úbytek hmotnosti vzorku

Digitální váha pro sledování úbytku hmotnosti byla zaizolována minerální vatou, aby nedošlo k jejímu poškození a ovlivňování výsledků měření. Sledována byla pouze hmotnost u jednoho vzorku, z důvodu obav o zapůjčenou váhu. Vážen byl vzorek č.1.

Před začátkem zahřívání se změřila a zaznamenala hmotnost betonového vzorku. Ta činila 46,774 kg, poté začal experiment a jednotlivé hmotnosti byly zapisovány v 5. minutových intervalech. Jednotlivé hmotnosti v konkrétních časech lze vidět v tab. 14

tab. 14 Úbytek hmotnosti během experimentu

Čas [min]	Hmotnost [kg]
0	46,774
5	46,695
10	46,648
15	46,623
20	46,524
25	46,452
30	46,554
35	46,420
40	46,189
45	46,355
50	46,218
55	46,120
60	46,054
65	45,945

70	45,842
75	45,761
80	45,496
85	45,472
90	45,318
95	45,240
100	45,148
105	44,962
110	44,923
115	44,901
120	44,858
125	44,812
130	44,802
135	44,720
140	44,700
145	44,692
150	44,638

Zahřívání bylo ukončeno po 105 minutách a poté byla stále zaznamenávána hmotnost vzorku při chladnutí. Z tabulky lze vidět, že hmotnost se během experimentu zmenšila o 2,136 kg. Některé hodnoty ukazují vliv větru, konkrétně mezi 25. a 30. minutou a mezi 40. a 45. se hmotnost nepatrně zvýšila. Během experimentu se vlhkost z blízkosti ohřívajícího povrchu transportovala do chladnějších částí vzorku, tedy blíže k neohřívající části. Po dosažení větších teplot uvnitř vzorku se vlhkost začala odpařovat i na neohřívající straně viz obr. 59.



obr. 59 Odpařování vlhkosti na neohřívané straně



obr. 60 Úbytek hmotnosti během zahřívání

Na obr. 60 lze vidět hmotnostní úbytek během experimentu, který byl zaznamenáván po dobu zahřívání prvního vzorku.

6 Závěr

Tato práce měla za úkol přinést nějaké poznatky ohledně možností měření vlhkosti v betonu vystaveném vysokým teplotám. Práce byla konkrétně založená na experimentální analýze dvou betonových vzorků, které byly vytvořeny pro účel této práce. Cílem bylo zjištění, zda lze měřit vlhkostní změny při zvýšených teplotách.

Úvodní kapitola se věnovala teoretickému základu, jako je obecné seznámení s vlhkostí, jejím dělením, jejími zdroji a vlivy při zvýšených teplotách. Dále byla provedena rešerše jednotlivých metod měření vlhkosti v betonu za běžné teploty, konkrétně metod založených na koncentraci a metod založených na relativní vlhkosti, kde jsou v jednotlivých podkapitolách popsány způsoby měření. Další kapitola teoretické části se zabývala měřením vlhkosti v betonu za zvýšených teplot, konkrétně matematickými modely a experimentálním vyhodnocením pomocí nukleární magnetické rezonance.

Praktickou část této práce tvoří vlastní návrh experimentu, betonáž vzorků, jejich zahřívání a následné vyhodnocení. Nutno opět podotknout, že současně s touto prací vznikala i práce mého kolegy na téma „Metody měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám“, a tudíž se již před začátkem betonáže k bednění připevnila fixační zařízení, které sloužily pro elektrické termočlánky pro zaznamenávání teploty uvnitř betonových vzorků. Měření relativní vlhkosti uvnitř betonových vzorků bylo zajištěno pomocí plastových pouzder Hygropin, které byly při betonáži vloženy do vzorků s předem připravenou délkou.

Úvodní kapitoly praktické části se věnují právě návrhu experimentu, konkrétně rozmístění a hloubce jednotlivých plastových pouzder. Dále průběhu betonáže v laboratoři ČVUT v Praze.

Další část se týká samotného experimentu. Detailně je zde popsána příprava stanoviště před zahájením zahřívání, tedy vnošení jednotlivých komponentů potřebných k uskutečnění experimentu na místo konání, dále zabezpečení vzorku před únikem tepla do okolí pomocí skelné vaty a dřevěných blokad, uložení vzorku na digitální váhu sloužící pro zaznamenávání úbytku hmotnosti během zahřívání a napojení jednotlivých termočlánků k dataloggeru.

Další částí je vyhodnocení experimentu. Od doby uskladnění betonových vzorků po betonáži až do doby uskutečnění experimentu byly v měsíčních intervalech zaznamenávány změny relativní vlhkosti uvnitř betonových vzorků. Betonáž proběhla 22. května 2018. První měření relativní vlhkosti bylo provedeno 9. srpna 2018 a poslední přesně týden po uskutečnění experimentu.

Jak už bylo zmíněno výše, cílem této práce bylo zjištění, zda je možné změřit vlhkost v betonu při zvýšených teplotách. I přes to, že má tato metoda měření vlhkosti své teplotní limity, z důvodu tavení plastových pouzder sloužících pro sondu, byla použita. Plastová pouzdra uvnitř vzorků zdolala zahřívání a mohla tak posloužit pro poslední změření relativní vlhkosti. Ovšem kromě teplotních limitů má tato metoda další nevýhodu, kterou během zahřívání nelze zanedbat. Měření relativní vlhkosti v plastových pouzdrech potřebuje značný čas pro ustálení dané vlhkosti, což u rychlého děje, jakým požár je, nelze dosáhnout. Tato metoda měření vlhkosti může být

použita způsobem, jakým se využila zde, tedy změření relativní vlhkosti před začátkem experimentu a poté po experimentu. Ovšem s využitím materiálu, který je schopný odolávat vysokým teplotám, například termoplastu, kovu či jiného materiálu s protipožární ochranou.

Závěrem je vhodné podotknout, že cíl této práce byl dosažen. Vlhkost uvnitř betonového vzorku lze změřit, jedná se o metodu nepoužitelnou během experimentálního zahřívání, ovšem pro zjištění zbytkové relativní vlhkosti se značnými úpravami je použitelná. Porovnání experimentu s numerickým modelem nebylo součástí této práce a jedná se tedy o podnět pro další výzkum tohoto tématu. V dnešní době jsou již známy některé modely vlhkostní transportu a výpočetní programy, například software Hygrotherm Analysis vytvořený na fakultě stavební ČVUT v Praze, nabízí rozložení vlhkosti v čase v závislosti na teplotě uvnitř betonu, ovšem jeho použití a porovnání s výsledky tohoto experimentu nebylo možné z důvodu velkého množství neznámých hodnot, které se v rámci této práce neměřily a jeho aplikace by tak nepřinesla žádné reálné a věrohodné výsledky, zároveň to ani nebylo cílem této práce a bude to předmětem dalších prací a výzkumných úkolů na fakultě stavební ČVUT.

Seznam obrázků

obr. 1 Druhy cementů podle ČSN EN 197-1(převzato z [5])	11
obr. 2 Složení betonu v procentech (převzato z [5])	11
obr. 3 Sorpční izoterma betonu pro 20 °C (obrázek převzat z [2])	14
obr. 4 Nastavení gama záření (obrázek převzat z [10])	18
obr. 5 Kapacitní senzor (obrázek převzat z [1])	18
obr. 6 Snímač odporu (obrázek převzat z [1])	19
obr. 7 Měření specifického odporu pomocí 4 elektrod (obrázek převzat z [1])	19
obr. 8 Příklad vlhkostní mapy se sondou ve 3 cm (obrázek převzat z [12])	20
obr. 9 Vlhkoměr MOIST (obrázek převzat z [12])	20
obr. 10 Pouzdro pro standartní a čerstvé betonové aplikace (obrázek převzat z [13])	21
obr. 11 In-site sonda (obrázek převzat z [13])	21
obr. 12 Měřicí obal (obrázek převzat z [13])	22
obr. 13 Doplněk pro mokrý beton (obrázek převzat z [13])	22
obr. 14 Závislost tlaku a objemu ve vztahu k obsahu vody na teplotě (převzato z [3])	27
obr. 15 Srovnání simulovaných a experimentálních distribucí obsahu odpařitelné vody v různých časech (obrázek převzat z [3])	28
obr. 16 Srovnání simulovaných a experimentálních rozložení tlaku v různých časech (převzato z [3])	28
obr. 17 Srovnání simulovaných a experimentálních rozložení tlaků v různých časech (převzato z [3])	29
obr. 18 Srovnání simulovaných a experimentálních vztahů mezi tlakem a teplotou v pěti polohách (obrázek převzat z [3])	29
obr. 19 Jednorozměrný model (obrázek převzat z [3])	30
obr. 20 Schématický diagram nastavení NMR. (Obrázek převzat z [8])	31
obr. 21 Charakterizace betonového vzorku pomocí NMR s různým obsahem vlhkosti – rozložení relaxačního času získaného během sušení nasyceného betonu. Signální rozpady byly měřeny za použití Ostroff-Waughovy sekvence (obrázek převzat z [8])	33
obr. 22 Charakterizace betonového vzorku pomocí NMR s různým obsahem vlhkosti – kalibrace NMR signálu s ohledem na množství vlhkosti přítomné v betonu. NMR signál vyneseno v závislosti na normalizované hmotnosti m/m_0 . (obrázek převzat z [8])	34
obr. 23 (a) profily neřízeného signálu (S) v závislosti na poloze uvnitř betonu. (b) Časový vývoj teplotních profilů, polohy termočlánků jsou označeny černými tečkami. (obrázek převzat z [8])	34

obr. 24 Arrheniusovy grafy spočívají v příčné relaxační době.a) relaxační doby vody v gelových pórech, b)kapilární póry, c) betonové trhliny a d) sádra. Pevné čáry jsou záchvaty přímky k datům. (obrázek převzat z [5]).....	35
obr. 25 (a) První tři příspěvky k celkové korekci teploty jako funkce teploty. Faktor korekce teploty pro nukleární magnetizaci ($1/T$, pevná čára). Extra příspěvek povrchové relaxace pro betonové póry (přerušovaná čára). Zvláštní příspěvek kapilárních pórů (čárkovaná čára). (b) Opravy aplikované na surový signálový profil v betonu po 42 minutách (plná čára). Signální profil, který je korigován pro teplotní závislost magnetizace, je označen M. Profil vlhkosti, který koriguje teplotní závislost magnetizace i relaxace, je indikován M + R. Celkový korekční faktor je znázorněn tučnou křivkou.(převzato z [8]).....	35
obr. 26 (a) Opravené profily vlhkosti a (b) teplotní profily. Jak teplota rychle stoupá na více než 100 ° C, dochází k rozvoji varu.). Přerušovaná čára označuje izotermii 100 ° C. Při postupujícím postupu varu se vyvíjí vrchol vlhkosti. Tento vrchol se zvyšuje a dosáhne saturace po 30 minutách. Teploty na vrcholu vlhkosti jsou uvedeny v teplotních profilech (h). Teplota na povrchu se zvyšuje na přibližně 350 ° C. Profily jsou zobrazovány každých 8,5 min. Šipky na obrázcích ukazují pokrok v čase. [8].....	36
obr. 27 Rozměry betonového vzorku	37
obr. 28 Rozmístění termočlánků v prvním vzorku (obrázek převzat z [16]).....	38
obr. 29 Rozmístění termočlánků ve druhém vzorku (obrázek převzat z [16]).....	39
obr. 30 Rozmístění měřících pouzder ve vzorku obr. 31 Půdorysné rozmístění pouzder... 40	
obr. 32 Fixátor u vzorku č.1 obr. 33 Fixátor u vzorku č.2	41
obr. 34 Pouzdra pro měření vlhkosti	42
obr. 35 Složky betonu obr. 36 Plastifikátor	43
obr. 37 Složky v míchačce obr. 38 Horní otvor míchačky.....	43
obr. 39 Betonáž vzorků obr. 40 Betonáž vzorků.....	44
obr. 41 Rozmístění ve vzorku č.1 obr. 42 Rozmístění ve vzorku č.2.....	44
obr. 43 Umístění vzorků v laboratoři	45
obr. 44 Měření RH vzorků před experimentem	46
obr. 45 Uspořádání experimentu	47
obr. 46 Zahřívání vzorku obr. 47 Zaznamenávání teplot	48
obr. 48 Rozmístění jednotlivých pouzder ve vzorku	49
obr. 49 Měření RH vzorků po experimentu	54
obr. 50 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 4.....	55
obr. 51 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 6.....	56
obr. 52 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 6'	57
obr. 53 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 8.....	57

obr. 54 Porovnání RH v čase obou vzorků u pouzdra 8'	58
obr. 55 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.1, 4-6-8	59
obr. 56 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.1, 4-6'-8'	60
obr. 57 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.2, 4-6-8	61
obr. 58 Průběh vlhkosti v závislosti na prostoru v jednotlivých měsících – vzorek č.2, 4-6'-8'	62
obr. 59 Odpařování vlhkosti na neohřívané straně.....	65
obr. 60 Úbytek hmotnosti během zahřívání	65

Seznam tabulek

tab. 1 Změna v betonu při zahřívání (převzato z [6]).....	12
tab. 2 Klasifikace vlhkosti v betonu (převzato z [6]).....	13
tab. 3 Složení betonu použitého v experimentu (Radek Štefan, 2018).....	42
tab. 4 Naměřené hodnoty srpen, vzorek č.1	50
tab. 5 Naměřené hodnoty srpen, vzorek č.2	50
tab. 6 Naměřené hodnoty září, vzorek č.1	50
tab. 7 Naměřené hodnoty září, vzorek č.2.....	51
tab. 8 Naměřené hodnoty 3.října, vzorek č.1	51
tab. 9 Naměřené hodnoty 3.října, vzorek č.2	51
tab. 10 Naměřené hodnoty 25.října, vzorek č.1	52
tab. 11 Naměřené hodnoty 25.října, vzorek č.2	52
tab. 12 Naměřené hodnoty po experimentu, 1.listopadu, vzorek č.1	53
tab. 13 Naměřené hodnoty po experimentu, 1.listopadu, vzorek č.2	53
tab. 14 Úbytek hmotnosti během experimentu	63

7 Literatura

- [1] QUINCOT, Gonzalo, Miguel AZENHA, Joaquim BARROS a Rui FARIA. *Methods to measure moisture in concrete*. Guimarães, 2011. FCT.
- [2] BAŽANT, Zdeněk a Werapol THONGUTHAI. PORE PRESSURE AND DRYING OF CONCRETE AT HIGH TEMPERATURE. *Journal of the engineering mechanics division*. 1978, (5), 1059-1079.
- [3] ICHIKAWA, Y. a G.L. ENGLAND. Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures. *Nuclear Engineering and Design* [online]. 2004, **228**(1-3), 245-259 [cit. 2018-10-13]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2003.06.011. ISSN 00295493. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549303002942>
- [4] ŠTEFAN, Radek. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures: Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling*. Praha, 2015. Dizertační práce. ČVUT.
- [5] *EBeton* [online]. b.r. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: www.ebeton.cz
- [6] KUČA, Martin. *Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT.
- [7] KUČERA, Petr, Tereza ČESELKÁ a Pavlína MATEČKOVÁ. *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-094-4.
- [8] VAN DER HEIJDEN, G.H.A., H.P. HUININK, L. PEL a K. KOPINGA. One-dimensional scanning of moisture in heated porous building materials with NMR. *Journal of Magnetic Resonance* [online]. 2011, **208**(2), 235-242 [cit. 2018-04-10]. DOI: 10.1016/j.jmr.2010.11.010. ISSN 10907807. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1090780710003599>
- [9] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.

-
- [10] VILLAIN, Géraldine a Mickaël THIERY. Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete. *NDT & E International* [online]. 2006, **39**(4), 328-337 [cit. 2018-04-10]. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.10.002. ISSN 09638695. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869505001507>
- [11] MERRITT, A.J., J.E. CHAMBERS, P.B. WILKINSON, L.J. WEST, W. MURPHY, D. GUNN a S. UHLEMANN. Measurement and modelling of moisture—electrical resistivity relationship of fine-grained unsaturated soils and electrical anisotropy. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2016, **124**, 155-165 [cit. 2018-12-19]. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.11.005. ISSN 09269851. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926985115300574>
- [12] Mikrovlnné vlhkoměry MOIST: Nedestruktivní a spolehlivé měření vlhkosti stavebních materiálů. *TESTO* [online]. 2015 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/12289-mikrovlne-vlhkomery-moist-nedestruktivni-a-spolehlive-mereni-vlhkosti-stavebnich-materialu>.
- [13] *Proceq: Hygropin portable moisture tester* [online]. Swiss Solutions since 1954, 2016 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.proceq.com/product/hygropin/>
- [14] BENEŠ, Michal a Radek ŠTEFAN. Hygro-thermo-mechanical analysis of spalling in concrete walls at high temperatures as a moving boundary problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2015, **85**, 110-134 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.050. ISSN 00179310. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931015000587>
- [15] KASPO: plynové infrazářice. *KASPO: plynové infrazářice* [online]. Praha, b.r. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.kaspo.cz>
- [16] HAVLŮJ, Jan. *Metody měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám*. Praha, 2018. Seminární práce. ČVUT.