



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**INTERAKCE MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ S VLHKOSTÍ
V PROSTŘEDÍ PÓROVITÉHO STAVIVA**

INTERACTION OF MICROWAVE RADIATION WITH MOISTURE IN POROUS BUILDING
MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Pařha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL ŠUHAJDA, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Martin Pařha
Název	Interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva
Vedoucí práce	doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

(1) Směrnice děkana č. 19/2011 s dodatky a přílohami; (2) Stavební zákon č. 183/2006 Sb. v platném a účinném znění; (3) Vyhláška č. 499/2006 Sb. v platném a účinném znění; (4) Vyhláška č. 268/2009 Sb. v platném a účinném znění; (5) Vyhláška č. 398/2009 Sb.; (6) Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. O ochraně zdraví před neionizujícím zářením, (7) Informace Národní referenční laboratoře pro neionizující elektromagnetické pole záření, (8) NRL č.1/1999, (9) NRL č.3/1999, (10) NRL č. 9/2001, (11) Platné normy ČSN a EN; (12) Katalogy stavebních materiálů a konstrukčních systémů; (13) Odborná literatura.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Zadání: Zpracování teoretické práce zabývající se působením mikrovlnného záření na vlhký silikátový stavební materiál, konkrétně se jedná o pórobeton. Účelem je zjednodušeně popsat vliv mikrovlnného záření na vlhkost obsaženou ve stavebním materiálu. Dále je vhodné se zabývat interakcí mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí této pórovité látky.

Práce bude řešena experimentálním měřením a jednoduchými simulacemi, tak budou získány výsledky měření a simulací. Tyto budou následně vzájemně komparovány, verifikovány, a budou z nich vyvozeny patřičné závěry.

Zásadním úkolem pro studenta je ukázat, že umí vědecky pracovat, že umí pracovat s naměřenými daty, tedy že umí získat měřené hodnoty, tyto umí zpracovat a umí z nich vyvodit patřičné závěry.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá interakcí mikrovlnného záření s vlhkostí v pórovitém materiálu. Zkoumá rozložení teplotního pole, efektivitu metody a finanční náročnost metody. Nejdůležitější část práce byl provedený experiment, ze kterého vycházeli veškeré důležité hodnoty. První část práce se zabývá potřebnou teorií a druhá část práce je samotný experiment. Experiment byl uskutečněn pro tři stupně vlhkosti materiálu. Bylo použito osm vzorků pro tento experiment, které po celou dobu experimentu, zůstaly nezměněny. Diplomová práce čerpá z předešlých výzkumů, které byly provedeny na toto, či podobné téma.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrovlnné záření, pórobeton, YTONG, sanace vlhkosti, vlhkost, vysoušení, generátor mikrovln, mikrovlny ve stavebnictví, metody sanace, experiment, teplotní pole, finanční náročnost, účinnost metody

ABSTRACT

This thesis deals with interaction of microwave radiation with wet in porous material. It examines the distribution of the temperature field, the efficiency of the method and the financial demands of the method. The most important part of this thesis was an experiment, from which all important values were based. The first part deals with the necessary theory and the second part is the experiment itself. The experiment was carried out for three levels of material wet. Eight samples were used for this experiment, which remained unchanged throughout the experiment. The thesis draws on previous researches that were carried out on this or similar topic.

KEYWORDS

microwave radiation, aerated concrete, YTONG, rehabilitation of wet, wet, desiccation, microwave generator, microwaves in building industry, methods of rehabilitation, experiment, temperature field, cost, method efficiency

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Martin Pařha *Interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva*. Brno, 2020. 128 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 8. 1. 2020

Bc. Martin Pařha
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8. 1. 2020

Bc. Martin Pařha
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto textem bych chtěl poděkovat zejména panu doc. Ing. Karlu Šuhajdovi, Ph.D., který příkladně vedl tuto práci a byl poradcem pro problematiku, která mi byla neznámá. Děkuji panu Ing. Františkovi Vlachovi, Ph.D., který byl poradcem v otázkách technických.

Dík patří i Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební VUT v Brně za možnost věnovat se diplomové práci na toto téma a za poskytnutí potřebných materiálů a přístrojů k provedení experimentu.

Velký dík patří mé přítelkyni Michaele, za její podporu a utvoření pohodové atmosféry pro práci. Dále chci poděkovat rodině Plškových a své vlastní rodině za podporu, lásku a potřebnou pomoc, která byla nutná pro dokončení diplomové práce.

V Brně dne 10.01.2020

Bc. Martin Pařha

PŘEHLED POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
a_d	$[m^3]$	Množství absorbovaného plynu
b	$[m]$	Tloušťka zdiva, rozměr vzorku
C	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$	Hmotnostní vzlinavost (kapilarita)
c_λ	$[m.s^{-1}]$	Rychlost šíření vlny
d	$[m]$	Průměr kapiláry, hloubka, tloušťka vrstvy
d_μ	$[m]$	Difuzní odpor
D	$[m^2.s^{-1}]$	Součinitel difuze vodní páry ve vzduchu
e_u	$[J.kg^{-1}]$	Měrná vazebná energie
F	$[N]$	Síla
f	$[Hz]$	Frekvence vlnění
G	$[J]$	Volná entalpie
H_v	$[-]$	Stupeň hydrofobizace
h	$[m]$	Výška vzlinuté vody, výška vzorku
k	$[-]$	Koeficient odpařování
L_v	$[MJ]$	Skupenské teplo vypařování
l_v	$[MJ.kg^{-1}]$	Měrné skupenské teplo vypařování
m	$[kg]$	Hmotnost
m_s	$[kg]$	Hmotnost suchého vzorku
m_w	$[kg]$	Hmotnost vlhkého vzorku
NV	$[\%]$	Hmotnostní nasákavost
$NV_{v,s}$	$[\%]$	Nasákavost varem na vodní hladině nehydrofobizované látky
$NV_{v,h}$	$[\%]$	Nasákavost varem na vodní hladině hydrofobizované látky
P	$[W]$	Výkon generátoru mikrovln
p	$[\%]$	Pórovitost
p	$[Pa]$	Tlak
ΔpH	$[-]$	Rozdíl pH
p_{p1}	$[Pa]$	Částečný tlak vodní páry na vnitřním povrchu
p_{p2}	$[Pa]$	Částečný tlak vodní páry na vnějším povrchu
q_{md}	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$	Hustota hmotnostního toku vodní páry

Symbol	Jednotka	Popis
q_{mt}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	Hustota hmot. toku kapalné vody transmisí
Q_{md}	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Difuzní tok vodní páry
r_p	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Plynová konstanta vodní páry
r_w	$[\text{m}]$	Poloměr kapiláry
S	$[\text{m}^2]$	Plocha
T	$[\text{K}]$	Termodynamická teplota
t	$[\text{°C}]$	Teplota
V	$[\text{m}^3]$	Objem tělesa
V_p	$[\text{m}^3]$	Objem pórů
V_T	$[\text{m}^3]$	Objem pórovité látky
V_w	$[\text{m}^3]$	Objem vody
$dW, \Delta W$	$[\text{J}]$	Práce
δ	$[\text{s}]$	Součinitel difuze vodní páry
η_p	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná plynová konstanta vodní páry
λ	$[\text{m}]$	Délka vlny u vlnění
μ	$[-]$	Faktor difuzního odporu
ρ_m	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Měrná hmotnost kapaliny
ρ_s	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Objemová hmotnost suché látky
ρ_w	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Objemová hmotnost vody
σ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}]$	Povrchové napětí kapalin
σ_{po}	$[\text{MPa}]$	Pevnost v tahu
σ_{pd}	$[\text{MPa}]$	Pevnost v tlaku
τ	$[\text{s}, \text{hod}]$	Čas
φ	$[\%]$	Relativní vlhkost vzduchu

OBSAH

ÚVOD.....	13
1.ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ POZNATKY.....	14
1.1.1.Vlhkost obecně.....	14
1.1.2.Pórovitost	15
1.1.3.Nasákavost	16
1.1.4.Chemismus zdiva	17
1.1.5.Rovnovážná vlhkost.....	18
1.1.6.Ustálená a výrobní vlhkost.....	20
1.1.7.Kritická vlhkost.....	21
1.1.8.Měrná vazebná energie	21
1.1.9.Termodynamická přenosová síla	22
1.1.10.Chemický potenciál vlhkosti.....	22
1.1.11.Vodivost vlhkosti	23
1.2.PÓROBETON.....	23
1.2.1.Fyzikálně mechanické charakteristiky pórobetonu.....	23
1.2.2.Fyzikální vlastnosti působení vlhkosti v pórobetonu.....	24
1.2.3.Pórovitost	25
1.2.4.Nasákavost	26
1.2.5.Chemismus zdiva	26
1.2.6.Rovnovážná vlhkost.....	28
1.2.7.Ustálená a výrobní vlhkost.....	28
1.2.8.Kritická vlhkost.....	28
1.2.9.Měrná vazebná energie	28
1.2.10.Termodynamická přenosová síla	29
1.2.11.Chemický potenciál vlhkosti.....	29
1.2.12.Vodivost vlhkosti	29
1.3.Pohyb vody v pórovitém prostředí.....	30
1.3.1.Vzlínavost	30
1.3.2.Difuze vodní páry.....	31
1.3.3.Kondenzace vodní páry.....	32

1.3.4. Transport vody dalšími mechanismy	33
2. ODSTRAŇOVÁNÍ VLHKOSTI ZE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ	35
2.1. METODY VYSOUŠENÍ STAVEBNÍCH LÁTEK	35
2.1.1. Samovolné vysychání	35
2.1.2. Elektrické vysoušeče	36
2.1.2.1. Teplometné vysoušeče	37
2.1.2.2. Kondenzační odvlhčovače	38
2.1.2.3. Adsorpční odvlhčovače	40
2.1.3. Mikrovlnné záření	41
3. POUŽITÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ PRO VYSOUŠENÉ STAVEBNÍCH LÁTEK	42
3.1. TEORIE MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ	42
3.2. ŠÍŘENÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ	44
3.3. POUŽITÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ VE STAVEBNICTVÍ	44
3.3.1. Mikrovlnné vysoušecí metody	44
3.3.2. Mikrovlnné měření vlhkosti zdiva a stavebních látek	45
3.3.2.1. Metody měření ve volném prostoru	46
3.4. PŮSOBENÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA ŽIVÝ ORGANISMUS	47
3.4.1. Netepelné účinky	48
3.4.2. Tepelné účinky	48
3.4.3. Hygienické normy	48
3.5. VLIV MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA KOVOVÉ PŘEDMĚTY	51
3.6. INTERAKCE MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ S VLHKOSTÍ	51
3.6.1. Vypařování a kapalnění	51
3.6.2. Působení mikrovln na molekuly vody	52
3.6.3. Sytá pára	52
3.7. SHRNUTÍ POZNATKŮ O MIKROVLNNÉM ZÁŘENÍ	53
3.7.1. Výhody mikrovlnného záření	53
3.7.2. Nevýhody mikrovlnného záření	53
4. VYMEZENÍ PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	55
4.1. PREDIKCE EXPERIMENTU	55

4.2.VYMEZENÍ PROBLEMATIKY	55
4.3.STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	56
4.3.1.Rozložení teplotního pole vlivem vlhkosti v pórovitém materiálu	57
4.3.2.Účinnost zařízení.....	57
4.3.3.Finanční náročnost vysoušení	57
5.EXPERIMENT.....	58
5.1.POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	58
5.2.POPIS EXPERIMENTU.....	62
5.3.VÝSLEDKY EXPERIMENTU	68
5.4.SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	101
6.ZÁVĚR.....	104
6.1.ZJIŠTĚNÉ POZNATKY.....	104
7.CITOVANÉ ZDROJE.....	106
8.PŘÍLOHY.....	109

ÚVOD

Pórovité stavební materiály jsou daleko více náchylné na působení vlhkosti na rozdíl od betonu, či pálenému střepec. V dnešní době jsou však oblíbené pro svoji opracovatelnost, váhu a tepelné vlastnosti. Proto se s nimi setkáváme daleko častěji, než v dřívějších dobách, a proto se bude daleko více řešit jejich případná sanace. Od sanace očekáváme co nejmenší ekonomickou náročnost, co nejvyšší účinnost a co nejmenší časovou náročnost. Obvykle hledáme tedy kompromis, který má nejlepší aspekty výše zmiňovaných požadavků. Metody sanací se neustále vyvíjí a jejich účinnost je vyšší a vyšší, je to technologie jako každá jiná a tak se neustále posouvá kupředu.

Využití mikrovlnného záření se zdá jako dobrá volba nedestruktivní sanace vlhkosti v materiálu. Doposud proběhlo mnoho zkoušek a výzkumů, zabývajících se touto problematikou, protože v tom odborníci vidí určitý potenciál. Ne vždy je možné vlhké zdivo odstranit, nebo zcela vyměnit konstrukci. Z tohoto důvodu je nutné, aby se zatím známe nedestruktivní metody dále rozvíjely a zlepšovala se jejich účinnost a zmenšovala ekonomická a časová náročnost. Toho lze dosáhnout pouze tehdy, pokud bude daná problematika dostatečně zkoumaná nejen v laboratorních podmínkách, ale i přímo ve stavební praxi. Tato metoda může trpět hlavně na neinformovanost veřejnosti. I v dnešní době je pro některé jedince mikrovlnné záření strašák, se kterým nechtějí přijít do styku. Bojí se o své zdraví a nevěří mikrovlnné technologii. Toto je jedním z důvodů, proč se tato technologie ve stavebnictví více nevyužívá.

Má práce se zaměří výhradně na využití mikrovlnného záření jako sanace pro vlhké pórovité zdivo. V první části mé práce se zaměřím na základní teoretické poznatky a samotná interakce vlhkosti a mikrovln. V pokračování práce budu zkoumat potřebný čas pro sanaci, ekonomickou náročnost procesu a rozložení teplotního pole v daném stavivu, při použití dosavadních možných přístrojů pro mikrovlnné ozařování.

1. ZÁKLADNÍ TEORETICKÉ POZNATKY

1.1.1. Vlhkost obecně

Vlhkost popisuje výskyt vody v materiálu v jakékoliv podobě. Může se jednat o vodu v kapalném skupenství, plynném, ale i pevném ve formě ledu. Většina stavebních materiálů obsahuje vlhkost už z výroby vlivem použití vody pro jejich samotnou výrobu. Další vlhkost se do materiálů dostává ze vzduchu, kterou materiál pohltí do sebe. Další vlhkost do konstrukce vnášíme sami vlivem mokrých procesů výstavby. Největší výskyt vlhkosti je ale díky poruše, či živelné katastrofě (povodně).

Vlhkost výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů. Pokud budeme mluvit o ovlivňování fyzikálních vlastností jedná se zejména o tepelně-technické vlastnosti, které vlhkost výrazně zhoršuje. V případě mechanických vlastností se vlivem vlhkosti zhoršuje soudržnost materiálu a následná únosnost. Ať už v zabudovaném materiálu či volném vlhkost způsobuje problémy.

Vlhkost materiálu se udává v procentech a dle ČSN P 73 0610 se rozlišují tyto stupně vlhkosti:

Tab. 1) Stupeň vlhkosti zdiva

STUPEŇ VLHKOSTI	VLHKOST ZDIVA w V % HMOTNOSTI
velmi nízká	$w < 3$
nízká	$3 \leq w < 5$
zvýšená	$5 \leq w < 7,5$
vysoká	$7,5 \leq w < 10$
velmi vysoká	$10 < w$

Samotný výpočet hmotnostní vlhkosti je znám ze vztahu:

$$w = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (1.1)$$

kde m_u objemová hmotnost vlhkého vzorku [kg/m^3]

m_s objemová hmotnost suchého vzorku [kg/m^3]

Rozeznáváme i různé druhy vlhkosti. Pokud nastane stav, kdy při ustálených teplotních a vlhkostních poměrech nastane mezi vlhkostí materiálu a vlhkostí okolního vzduchu rovnováha, jedná se o tzv. rovnovážnou (sorpční) vlhkost. Další je výrobní vlhkost, která je v materiálu po ukončení jeho výroby, ta se postupem času snižuje, nebo zvyšuje v závislosti na klimatických a vnitřních podmínkách, tím se dostáváme k tzv. ustálené vlhkosti. [1]

1.1.2. Pórovitost

Pórovitost je vlastnost některých pevných nebo polotuhých materiálů, které jsou díky pórům ve své struktuře, daleko lehčí. Vyjadřuje se jako podíl objemu pórů a uzavřených dutin k celkovému objemu vysušeného materiálu.

Pórovitost je udávána procentuálním množstvím volného prostoru v látce a je známa ze vztahu:

$$p = \left(\frac{V_p}{V} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

kde V_p objem pórů [m^3]

V objem tělesa [m^3]

Póry v materiálu mají různé tvary (geometrii) a velikosti, díky tomu reagují za stejných podmínek různým způsobem. Jejich velikost je od těch nejmenších, které se mohou rovnat velikosti molekul, až po ty větší makroskopické. Z tohoto důvodu je důležité kategorizovat póry dle jejich velikosti. Pro zatřídění do jednotlivých kategorií je důležitý efektivní poloměr póru. V následující tabulce je přehled třídění pórů, dle jejich velikosti, podle jednotlivých klasifikací. [1][2]

Tab. 2) Přehled třídění pórů podle jejich velikosti

DEFINOVANÉ TYPY PÓRU d [nm]	KLASIFIKACE			
	IUPAC	DUBININ	CHEREMSKOJ	KODIKARA
Makro-	> 50	> 400-200	> 2000	10^6 - 10^4
Mezo-	50-2	$400-200 > d > 3-3,2$	-	-
Mikro-	2-04	< 1,4-1,2	$2000 > d > 200$	3×10^4 - 10^3
Supermikro-	2-07	$3-3,2 > d > 1,4-1,2$	-	10^3 -25
Ultramikro-	< 0,7	-	< 4-2	< 4-3
Submikro-	< 0,4	-	< 200	-

1.1.3. Nasákavost

V zásadě se jedná o schopnost určitého vysušeného materiálu přijímat do sebe vodu. Připravený vysušený vzorek ponoříme na určitou dobu za určitých podmínek a zjistíme, kolik vody je schopný pojmout. Dle normalizovaných metod rozeznáváme hmotnostní nasákavost a objemovou nasákavost.

Hmotnostní nasákavost, která se značí NV, se určuje ze vztahu:

$$NV = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (1.3)$$

Objemová nasákavost se dále přepočítá z tohoto vztahu:

$$NV_v = \frac{NV \times \rho_s}{\rho_w} \quad [\%] \quad (1.4)$$

kde m_u hmotnost vlhkého vzorku [kg]

m_s hmotnost suchého vzorku [kg]

ρ_s objemová hmotnost suchého vzorku [kg/m³]

ρ_w objemová hmotnost vody [kg/m³]

Nasákavost materiálu je významně ovlivněna hydrofobizace a hygroskopicitou. Za hydrofobizaci se považuje ošetření materiálu látkou, která vodu odpuzuje. Díky tomuto jevu se zmenšuje nasákavost materiálu. Stupeň hydrofobizace se značí H_v a udává, kolikrát se zmenší nasákavost hydrofobizovaného materiálu oproti nehydrofobizovaného výchozího materiálu. Ten to jevy je vyjádřen vztahem:

$$H_v = \frac{NV_{v,s}}{NV_{v,h}} \quad (1.5)$$

kde $NV_{v,s}$ nasákavost varem na vodní hladině nehydrofobiz. látky [%]

$NV_{v,h}$ nasákavost varem na vodní hladině hydrofobizované látky [%]

Hygroskopicitu označuje schopnost látky pohltit a udržet vzdušnou vlhkost. Hygroskopické materiály tuto činnost provádí samovolně. Látky, které jsou hygroskopické, se vyznačují schopností změkknout za vlhka a ztvrdnout za sucha. [1][3]

1.1.4. Chemismus zdiva

Ve stavebních materiálech probíhají i různé chemické reakce a děje. Při sanacích je nejsledovanější a nejdůležitější faktor pH. Ten nám znázorní míru kyselosti, zásaditosti či neutrality zdiva.

Hlavním produktem chemických reakcí jsou zejména soli. Soli mají vliv na významné vlastnosti materiálu (pórovitost, nasákavost, hygroskopicitu, pevnost, modul pružnosti apod.). Vyšší obsah soli v materiálu způsobí i jeho vyšší vlhkost, neboť soli mění materiál na hygroskopický a zabraňují tím přirozenému odpařování vlhkosti. Jinými slovy zcpávají póry. Pro zdivo běžně rozeznáváme tři anionty, jejichž soli (sírany, dusičnany a chloridy) jsou nejčastější příčinou destrukce zdiva a tím pádem i potřeby sanace. Problém se projeví výskytem různě zbarvených výkvětových solí. Vyskytují se na povrchu zdiva, v místech přechodu mezi suchou a vlhkou částí a mají podobu prášku, jehliček, krystalů a kůry. Tento jev má negativní estetický účinek, ale i negativní konstrukční účinky.

Z hlediska destrukce jsou nejvíce nebezpečné látky, které krystalizují. Při krystalizaci jsou některé krystalické soli schopné zvýšit svůj objem i více než stonásobně. Tím vytvářejí tlak, který může být roven až 200 MPa.

Chemismus zdiva může ovlivnit i samotná voda. Voda může obsahovat látky, které mění její přirozené vlastnosti. Do vody se tyto látky dostávají různě. Může se jednat o dešťovou vodu, podzemní či provozní. Z hlediska chemických vlastností rozdělujeme vodu na vodu kyselou, vodu síranovou a vodu hladovou. [1][4][5]

1.1.5. Rovnovážná vlhkost

Z fyzikálního hlediska se jedná o vlhkost, kterou materiál přijme ze vzduchu. U hygroskopických materiálů tato vlhkost kolísá v závislosti a relativní vlhkosti okolního vzduchu. Materiál reaguje na změny okolní vlhkosti. Při vzrůstu vlhkosti vzduchu dochází k sorpci vlhkosti v materiálu, při poklesu vlhkosti vzduchu dochází k desorpci vlhkosti v materiálu. Pro různé materiály je rovnovážná vlhkost různá.

Při konstantní teplotě nastávají rovnovážné stavy, které charakterizuje sorpční izoterma. Ta je závislá na tlaku a teplotě a představuje křivku, která prezentuje množství absorbované vodní páry v materiálu při dané relativní vlhkosti. Rovnici sorpční izotermy definovali pánové H. Freudlich a I. Langmuir:

$$a_d = \frac{k_1 \times p}{1 + k_2 \times p} \quad [\text{m}^3] \quad (1.6)$$

kde a_d množství plynu, který byl absorbován [m^3]

p tlak plynu [Pa]

k_1, k_2 ... konstanty

Charakteristikou rovnovážné vlhkosti je nulový přírůstek vlhkosti a teploty v čase. Tato charakteristika je znázorněná podmínkou:

$$\left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad \left| \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (1.7)$$

kde u vlhkost [%]

t teplota okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

τ čas [hod]

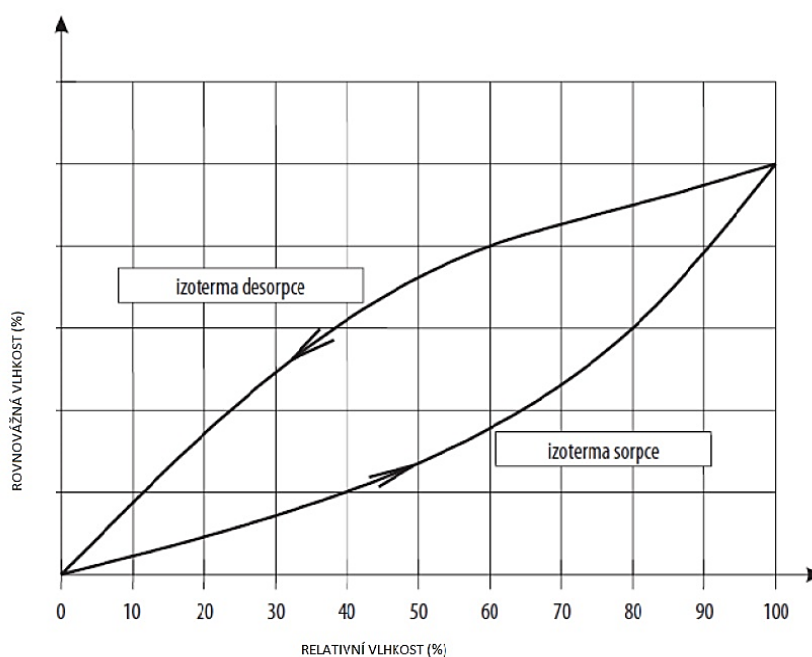
Tato podmínka je prakticky nespílnitelná, proto se rovnovážná vlhkost vyjadřuje závislostí:

$$u_{ms} = f(\varphi) \text{ pro } t = \text{konstanta} \quad (1.8)$$

kde u_{ms} hmotnostní rovnovážná vlhkost [%]

φ relativní vlhkost vzduchu [%]

Ve stavebnictví je nejčastější a nejvýznamnější absorbovaná látka vodní pára. Pokud je částečný (parciální) tlak vodní páry v materiálu nižší, než ten v okolním vzduchu, přijímá materiál vodní páru z okolního vzduchu. Tomuto ději říkáme sorpce. Při opačném postupu, kdy je částečný tlak vodní páry v materiálu vyšší, než v okolním vzduchu, materiál začne ztrácet a uvolňovat vodní páru do okolního vzduchu a tím vzniká jev zvaný desorpce. Oba tyto jevy jsou popsány izothermou, tedy křivkou znázorňující průběh sorpce a desorpce. Isotherma znázorňuje závislost relativní vlhkost na rovnovážné vlhkosti při určité teplotě.



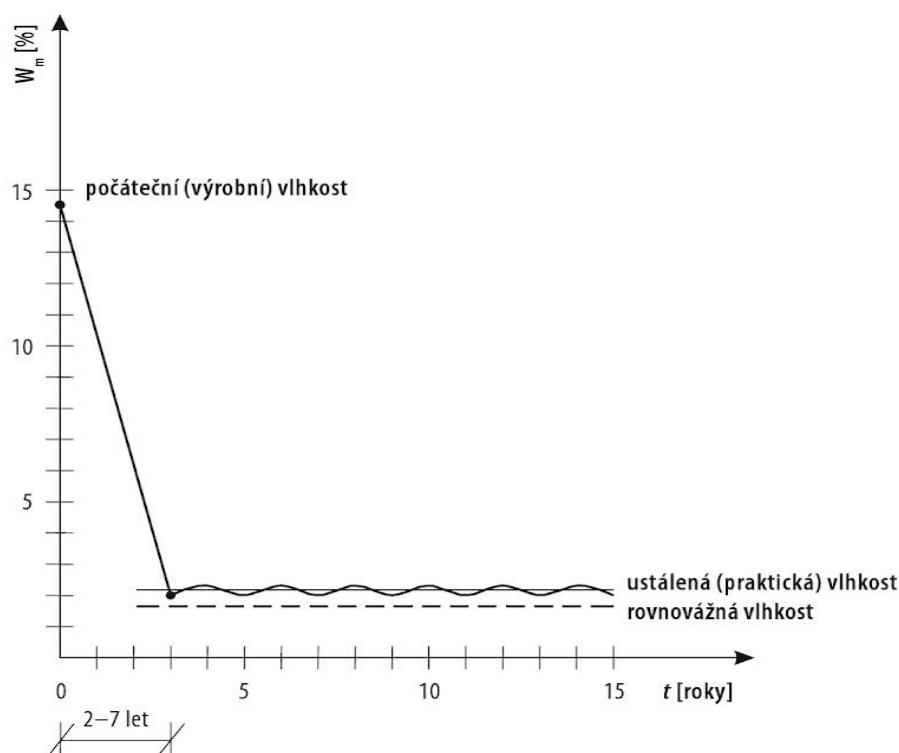
Graf. 1) Sorpční a desorpční izotherma [7]

Maximální sorpční (rovnovážná) vlhkost při $\varphi = 1$ je nazýváno hygroskopická vlhkost a značí se u_{mh} . Rozdíl mezi sorpční a desorpční větví izothermy nazýváme hysterzí. [1][6][7]

1.1.6. Ustálená a výrobní vlhkost

Ustálená vlhkost se v materiálu projeví až při použití na konkrétní stavbě po době běžného užívání. Jedná se o vlhkost spojenou s prostředím stavby. Tato vlhkost je charakteristická pro jednotlivé materiály.

Za výrobní vlhkost považujeme vlhkost, kterou má materiál v sobě těsně po své výrobě. Tato vlhkost postupně ustupuje vlivem klimatických podmínek prostředí, ve kterém je materiál uložen, až na hodnotu ustálené vlhkosti. Další možnost, jak popsat výrobní vlhkost je taková, že se jedná o vlhkost způsobenou mokřými procesy výstavby. Taková vlhkost vzniká třeba při zdění, kde je vlhkost vnášena do materiálu maltovinou. Při použití mokrého procesu nabývá vlhkost vysokých hodnot a postupným, přirozeným vysycháním dochází k ustálené vlhkosti [1][8]



Graf. 2) Časový průběh změny hmotnostní vlhkosti v závislosti na čase při použití mokrého procesu výstavby [8]

1.1.7. Kritická vlhkost

Při této vlhkosti dochází ke změně šíření vlhkosti difuzí na šíření vlhkosti v kapalném stavu. Je to maximální přípustná vlhkost, kterou lze uvažovat jako použitelnou pro materiál ve stavebnictví. Překročení této vlhkosti je pro stavebnictví nežádoucí a mnohdy i nebezpečné. Materiál podstatně mění své mechanické i fyzikální vlastnosti. Návrhová hodnota pro kritickou vlhkost jednotlivých materiálů je uvedena v ČSN 73 0540-3. [1][8]

1.1.8. Měrná vazebná energie

Měrná vazebná energie je označení pro energii potřebnou k odstranění vody z materiálu. Jedná se o základní ukazatel intenzity vazby vody v látce. V zásadě jde o určení energetického efektu hydrotermických procesů. Rovnice měrné vazebné energie je definována potřebou prací pro uvolnění vázané vody v materiálu a to při konstantní teplotě:

$$e_u = \frac{dW}{dm_u} = \frac{dW}{m_s \times d_u} \cong \frac{\Delta W}{m_s \times \Delta u} \quad [\text{J/kg}] \quad (1.9)$$

kde e_u měrná vazebná energie [J/kg]

dW práce [J]

ΔW práce [J]

m_s hmotnost suchého materiálu [kg]

m_u, d_u .. vlhkost [-]

Pokud se při uvolňování vlhkosti z materiálu mění částečný tlak vodní páry z tlaku vodní páry v materiálu na tlak vodní páry nad vodní hladinou a je přítomný izotermický děj ($dT = 0$), platí že: [1]

$$e_u = \eta_p \times \ln \varphi \times T \quad [\text{J/kg}] \quad (1.10)$$

kde η_p měrná plynová konstanta vodní páry [J/kg.K]

φ relativní vlhkost vzduchu [%]

T teplota [K]

1.1.9. Termodynamická přenosová síla

Termodynamika je věda o energii a termodynamická síla je hlavní příčinou přenosu vlhkosti. Tento přenos může být zrealizován izotermickým vztlínáním, difuzí vodní páry, povrchovou migrací absorbované vody apod.

Termodynamická síla je definovaná pomocí gradientu chemického potenciálu přenosu vlhkosti s absolutní teplotou: [1]

$$\vec{x}_u = -\frac{\nabla\mu_u}{T} \quad (1.11)$$

kde $\vec{x}_u$ termodynamická přenosová síla
 $\nabla\mu_u$ gradient chemického potenciálu vlhkosti
 T teplota [K]

1.1.10. Chemický potenciál vlhkosti

Jedná se o termodynamický potenciál přenosu vlhkosti. Gradient chemického potenciálu vlhkosti je hlavním důvodem děje přenosu vlhkosti, tedy pohybem vlhkosti v materiálu. Jeho definice vyplývá z parciální změny volné entalpie G podle látkového množství vlhkosti m_w . To vše při konstantním tlaku, teplotě a látkových množstvích ostatních složek. Výsledná rovnice vypadá takto:

$$\mu_u = \left| \frac{\partial G}{\partial m_w} \right| p, T, m_i \neq m_w \quad [\text{J/kg}] \quad (1.12)$$

kde μ_u chemický potenciál vlhkosti, která je obsažena v materiálu [J/kg]
 G volná entalpie [J]
 p tlak [Pa]
 T termodynamická teplota [K]
 m_i hmotnost materiálu [kg]
 m_w hmotnost vody [kg]

Děj znázorněný nerovnicí $m_i \neq m_w$ poukazuje na to, že vše probíhá při konstantní hmotnosti všech zúčastněných složek kromě hmotnosti vody.

Největší význam má chemický potenciál v tom, že pomocí něho můžeme určit zdroj vlhkosti, pomocí určení vlhkosti v jednotlivých místech materiálu.

Pohyb vlhkosti se řídí zákony termodynamiky. Tento zákon udává, že se vlhkost bude pohybovat z oblasti s vyšší hodnotou chemického potenciálu do oblasti s nižší hodnotou. Pomocí tohoto principu jsme schopni určit směr, kterým se bude vlhkost ubírat. [1]

1.1.11. Vodivost vlhkosti

Nebo-li transmise, je vlastností materiálu, která stanovuje schopnost vodit vlhkost v kapalném skupenství k jeho povrchu. Odtud se dále odpařuje, nebo difunduje. Voda se pohybuje v souvislých vodních kanálcích.

Transport vlhkosti nastává při dvou jevech. První jev je vlhkostní spád (gradient vlhkosti při teplotním rozdílu 0°C). Druhý jev je teplotní spád.

Během vlhkostního spádu a teplotního rozdílu 0°C se použije pro výpočet hustoty hmotnostního toku transmise kapalné vody Lykovův přenosový zákon:

$$q_{mt,1} = -\kappa_m \times \rho_s \times \frac{du}{dx} \quad [\text{kg/m}^2.\text{s}] \quad (1.12)$$

kde $q_{mt,1}$ hustota hmotnostního toku kap. vody transmisí $[\text{kg/m}^2.\text{s}^{-1}]$

κ_m Součet vlhkostní vodivosti při vlhkostním spádu $[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$

ρ_s objemová hmotnost materiálu za suchého stavu $[\text{kg/m}^3]$

$\frac{du}{dx}$ gradient vlhkosti $[\text{m}^{-1}]$ [1]

1.2. Pórobeton

1.2.1. Fyzikálně mechanické charakteristiky pórobetonu

Pórobeton je výrobek z jemnozrnného křemičito-vápenné, vápeno-cementové, nebo cementové směsi. Vylehčení, tedy samotná pórovitost, je dosažena pomocí hliníkového prášku. Po procesu výroby vzniká lehké, dobře zpracovatelné stavivo, které je oblíbené zejména pro svojí nízkou váhu. Dosahuje relativně malých objemových hmotností, při udržení poměrně velkých mechanických pevností. Normalizovaná pevnost pórobetonu (fb) se udává od 2,2 až 6,5 N/mm², přitom hodnoty objemové hmotnosti jsou v rozmezí 300 až 650 kg/m³ v suchém stavu. Záleží na určitém typu

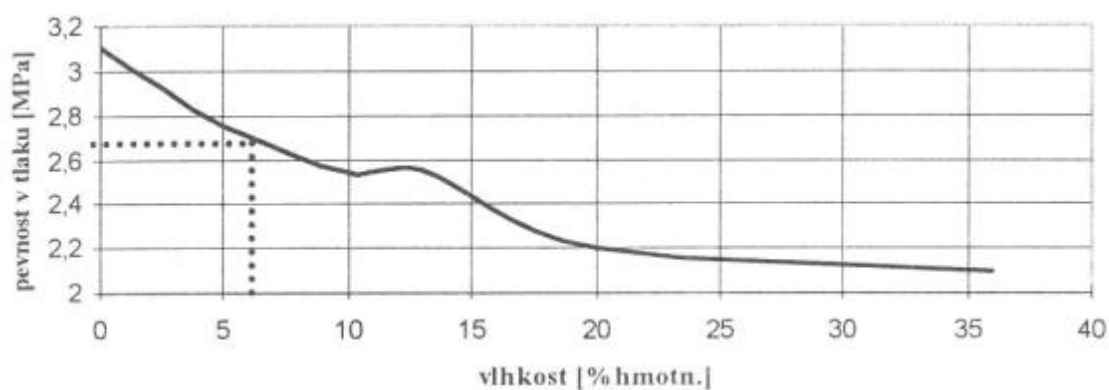
pórobetonové tvárnice. Nejčastěji se objemová hmotnost a pevnost v tlaku uvádí vzájemné souvislosti. Obvykle při určení tzv. koeficientu nosnosti, který odpovídá podílu pevnosti tlaku a objemové hmotnosti vynásobené stem. Výsledné hodnoty dosahují 0,4 až 1, přičemž hodnoty blíží se 1 jsou lepší, než blíží se 0,4.

Mezi další parametry, které jsou závislé na objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku je i modul pružnosti. Pórobeton má velmi malé trvalé deformace. Pracovní diagram má podobu křivky, která je velmi podobná křivce procházející počátkem. Díky tomuto chování pórobetonu můžeme uvažovat rovnost mezi modulem pružnosti a modulem přetvárnosti. Další rovnost uvažujeme mezi moduly pružnosti při různých stupních zatížení. Do výpočtu modulu pružnosti vstupuje i doba, po kterou je materiál vystaven účinkům zatížení, na vlhkosti a na směru působení síly vzhledem ke směru nakypření. Vzhledem k těmto okolnostem tedy nejsou směrodatné žádné empirické vztahy pro výpočet modulu pružnosti, ale hodnoty naměřené. Pórobeton tedy nabývá hodnot modulu pružnosti od 1100 až do 4500 MPa.

Pórobeton je dále oblíbený materiál pro jeho dobré tepelné technické vlastnosti. Tepelná vodivost u pórobetonu je ovlivněna přímo pórovitostí. Zmenšuje se poměrně rovnoměrně s objemovou hmotností materiálu, to znamená, že čím větší pórovitost v materiálu je, tím menší je tepelná vodivost materiálu. Tepelná vodivost, tepelná jímavost i tepelná akumulace je u pórobetonu v celku malá a díky tomu je pórobeton vhodný materiál do dnešního stavebnictví, kdy se dává důraz na hospodaření s energiemi. Návrhová hodnota tepelné vodivosti (λ_u) pórobetonových tvárníc je v rozmezí 0,083 W/mK (P2-300) až 0,179 W/mK (P6-650). [9][10][11]

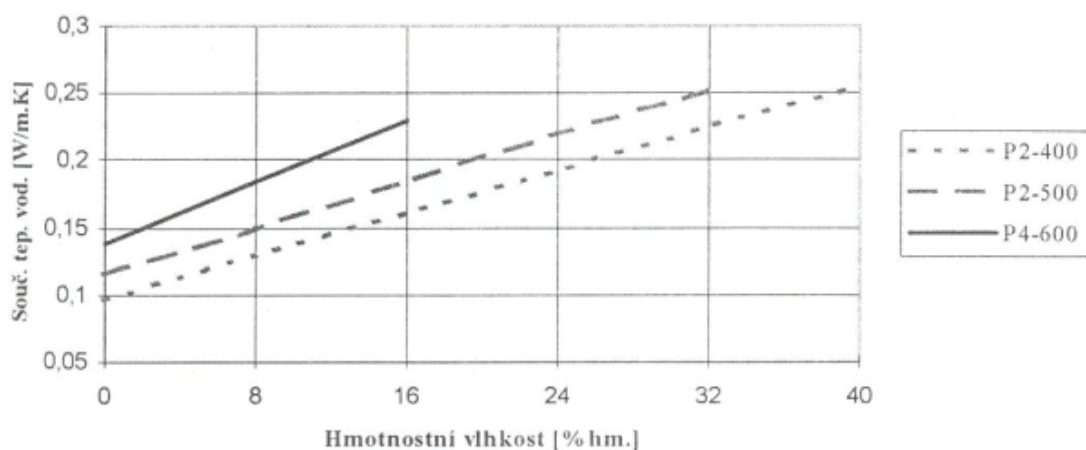
1.2.2. Fyzikální vlastnosti působení vlhkosti v pórobetonu

Logicky je pórobeton materiál, kde přítomnost vlhkosti nebude mít mnoho výhod a spíše bude degradovat některé více či méně důležité vlastnosti. Jeho struktura mu umožňuje ve větší míře přijímat vlhkost. Vlhkost negativně působí na pevnost v tlaku u pórobetonu, pevnost vlivem vlhkosti nejprve rychle klesá a následně pozvolně nepřestává klesat. Vzhledem k tomu, že ztráty při 6% vlhkosti mohou být v rozmezí, které odpovídá 15 – 20% počáteční pevnosti, je nutné vliv vlhkosti na pevnost v tlaku brát v potaz při statických výpočtech.



Graf. 3) Vliv vlhkosti na pevnost pórobetonu v tlaku (P2-400) [9]

Další vlastnost, kterou vlhkost negativně ovlivňuje, je tepelná vodivost. Tepelná vodivost pórobetonu se velkou měrou zvětšuje vlivem vzrůstající vlhkosti, takže materiál pak ztrácí své unikátní tepelně technické vlastnosti. [9][10][11]



Graf. 4) Závislost souči. tepelné vodivosti λ na vlhkosti v pórobetonu [9]

1.2.3. Pórovitost

Pórobeton je nejčastěji kusové stavivo, které je tvořené jemnozrnnou maltovinou a vylehčené mnoha drobnými póry. Díky pórům je struktura podobná baňkám, objemová hmotnost malá a tepelná vodivost příznivá.

Podle velikosti rozlišujeme dva druhy póru. Jedná se o makropority a mikropority.

Makropority jsou velikostně větší, než mikropority. Charakteristická je pro ně velikost o průměru několik desetin milimetrů, nejvýše několik mm. Materiál, který obsahuje makropority, označujeme jako makropórovité betony. Tyto betony dále rozdělujeme podle toho, jakým způsobem vznikly póry v maltové směsi. Jsou dva způsoby vytvoření pórů v maltovině a to chemickou, nebo mechanickou cestou. Chemická cesta zahrnuje uvolňování bublinek různých plynů, způsobené chemickou reakcí ve směsi přidanými látkami. Mechanická cesta funguje na principu zavádění do směsi vhodných pěnidel. Pěnidlo pak ve směsi vytváří vzduchové bublinky a tím vznikají póry.

Mikropority jsou menší, mají velikost menší než 1 μm . Póry v této skupině betonů vznikají tím, že se pro jejich přípravu volí směsi s vyšším obsahem záměsové vody. Při vysychání se přebytek vody vypařuje a vytváří tak kapilární póry. Vzniklé póry jsou opravdu malé, takže nejsou viditelné pouhým okem. [1][9]

1.2.4. Nasákavost

Nasákavost je schopnost pórobetonu přijmout do sebe vlhkost v podobě vody. Vyjadřuje se v procentech a je vyjádřena hmotnosti nasáknuté vody k hmotnosti vysušeného tělesa. Nasákavost je jedna z nevýhod pórobetonu, v případě pórobetonu se jedná o poměrně velké hodnoty. Voda kapiláry proniká do pórů a v nich zůstává uložena, vzhledem k velké četnosti pórů je pórobeton schopen pojmout větší množství vody a tím zvýšit razantně svoji vlastní váhu a snížit, vlivem vlhkost, své přední vlastnosti.

Pórobeton má vyšší nasákavost než pálená cihla, ale pálená cihla se vodou nasytí daleko rychleji oproti pórobetonu. Proto je na při určení nasákavosti důležitá i doba, po kterou je materiál vodě vystaven.

Zkouška nasákavosti probíhá na zkušebním tělese o rozměru 10x10x10 cm, které jsou vysušené při teplotě 105 °C. Po dobu 72 hodin se postupně vzorky ponořují do vody, z toho 48 hodin jsou vzorky zcela ponořeny. Běžný pórobeton má nasákavost v rozmezí 30 až 52 % hmotnostních. [8][9][10]

1.2.5. Chemismus zdiva

Pórobeton se skládá z písku, cementu, vápna, energosádrovce, anhydritu a hliníku. Veškeré složky jsou přidávány v přesném poměru.

Tab. 3) Materiálové složky [11]

Materiálové složky nebo přímo materiál	Váhové procento složky materiálu
Písek	65,0 %
Cement	20,0 %
Vápno	10,0 %
Energosádrovec	4,6 %
Anhydrit	0,3 %
Hliník	0,1 %

Z tabulky lze vyčíst, že nejvíce jsou zastoupeny klasické složky, písek s cementem, které tvoří nosné jádro pórobetonu. Vápno zrychluje zatvrdnutí směsi, jako další zvyšuje počáteční pevnost směsi. Energosádrovec je přidáván do směsi za účelem zlepšování pevnosti, dále pak oddaluje hašení vápna a tím redukuje zatužování směsi. Anhydrit redukuje časový průběh tuhnutí směsi a hliník se přidává pro vytvoření pórovitosti.

Díky pórovitosti mohou agresivní látky pronikat daleko více do hloubky materiálu, než v případě uzavřeného materiálu. Nepředpokládá se, že by pórobeton byl vystaven agresivní vodě, vzhledem k jeho nasákavosti a proto uvažujeme spíše působení škodlivých plynů a par (CO_2 , NO_2 , SO_2 apod.). Tyto látky jsou obsaženy v atmosféře a mohou více, či méně ovlivňovat vlastnosti pórobetonu.

Látky ovlivňující chemicky pórobeton se do materiálu mohou dostat už při zpracování, nebo až po jeho zatvrdnutí. Tyto látky vytváří soli. Lehce rozpustné soli se lehce vylouhují a tím ničí strukturu materiálu. Jiné soli přijímají krystalickou vodu a tím zvětšují svůj objem, tím mohou způsobovat trhliny v materiálu.

Rozpustné soli se derou z materiálu ven ve formě výkvětů. Tyto výkvěty způsobují ve vážných případech rozrušení pórobetonu, ale obvykle působí pouze neesteticky. Do materiálu se dostanou z některých přísad do pórobetonu, jako na

příklad z urychlovačů tuhnutí, vodního skla, CaCl_2 a další. Odstranění výkvětů je poměrně jednoduché, za sucha se kartáčováním odstraní.

Obecně se dá říct, že pórobeton se hodí převážně do prostředí, kde se chemicky agresivní látky nevyskytují. [9][10][11]

1.2.6. Rovnovážná vlhkost

Pokud se ustálí teplotní a vlhkostní poměry, můžeme říci, že nastává rovnováha mezi vlhkostí materiálu a vlhkostí okolního vzduchu. Pro pórobetony vyrobené z křemičitého písku je rovnovážná vlhkost stanovena na hodnotu okolo 6%. Pórobetony z elektrárenského popílku mají hodnotu rovnovážné vlhkosti o něco málo vyšší. Její hodnota se nachází mezi 8 až 10%. Záleží však na umístění materiálu, neboť rovnovážná vlhkost se odvíjí od relativní vlhkosti vzduchu a teploty prostředí, ve kterém se materiál nachází. [11][12][13]

1.2.7. Ustálená a výrobní vlhkost

Ustálená vlhkost pórobetonu je závislá na prostředí, ve kterém se materiál nachází. Této vlhkosti materiál dosáhne po určitém čase za předpokladu, že v prostředí, ve kterém se materiál nachází, se ustálila relativní vlhkost vzduchu a zůstala neměnná.

Na výrobu pórobetonu je potřeba značné množství vody, protože je vyráběn procesem hydrotermálním. Díky tomu jsou z továren expandovány tvárnice s relativně vysokou výrobní vlhkostí. Výrobce udává hodnotu výrobní vlhkosti na maximálně 32%. Tato vlhkost klesne po dvou týdnech na hodnotu rovnovážné vlhkosti zabudovaného materiálu, tedy materiál není pouze uložen na paletě. [9][10][11]

1.2.8. Kritická vlhkost

Tato vlhkost ovlivňuje zásadně vlastnosti daného materiálu. Při překročení této hranice není možné materiál použít ve stavební praxi. Pro pórobeton je uvedena v příslušných normách ČSN. [13]

1.2.9. Měrná vazebná energie

Měrná vazebná energie je označení pro energii potřebnou k odstranění vody z materiálu. Jedná se o základní ukazatel intenzity vazby vody v látce. V zásadě jde o určení energetického efektu hydrotermických procesů. Tento proces je velmi náročný na pochopení a pro samotnou diplomovou práci není dále řešen. [1]

1.2.10. Termodynamická přenosová síla

Termodynamická síla je hlavní příčinou přenosu vlhkosti. Tento přenos může být zrealizován izotermickým vzlínáním, difuzí vodní páry, povrchovou migrací absorbované vody apod. Do tohoto procesu vstupuje plno neznámých. Profesor Šťastník společně s docentem Šuhajdou se snažili namodelovat pohyb sil a více porozumět této problematice. Tíženého výsledku bohužel nebylo dosaženo vlivem složitosti celého procesu. Samotný výrobce zkoumá jen potřebné jevy, které mu udává norma, nebo zákon. Z důvodu složitosti celého procesu se v mé diplomové práci o problému zmiňuji, ale dále ho neřeším. [1]

1.2.11. Chemický potenciál vlhkosti

Popis děje se nachází v kapitole 1.2.11 Chemický potenciál vlhkosti. I tento děj není podrobně zpracován, vlivem jeho složitosti a zabývat se tímto dějem není předmětem mé diplomové práce. Zmínka o tomto jevu tu je z důvodu úplnosti problematiky působení vlhkosti v materiálech. [1]

1.2.12. Vodivost vlhkosti

Jedná se o transport vlhkosti z materiálu k jeho povrchu a následnému vypařování z povrchu. U porézních materiálů hraje velkou roli v transportu vlhkosti samotná pórovitost. Uspořádání jednotlivých pórů napomáhá k transportu anebo jej dokáže zbrzdit. Pokud jsou póry průběžné (otevřené), dokážou vodit vlhkost v kapalně formě i ve formě vodní páry, za pomoci difuze, z materiálu k povrchu. Také daleko rychleji vlhkost přijímají. Opakem jsou uzavřené póry, které podle všeho vlhkost nepřijímají. Slepé póry se vlhkostí naplní pomalu, problém nastává ve chvíli odvádění vlhkosti, protože tento proces trvá déle, než samotné naplnění.

Pro samotný pórobeton platí, že jeho póry klasifikujeme jako makropóry. Díky kapilární kondenzaci se makropóry nemohou zcela naplnit kapalnou vodou a tak transportní mechanismus kapalně fáze funguje výhradně jen v důsledku kontaktu s vodou. [1][13]

1.3. Pohyb vody v pórovitém prostředí

1.3.1. Vzlínavost

Vzlínavost, v našem případě hovoříme o kapilární vzlínavosti, je množství vody, která vzestoupí v materiálu vlivem kapilárního nasátí vody nad úroveň hladiny vody za určitý časový úsek. Pro tento jev však musí materiál přijít do styku s vodou. Vzlínavost není vůbec jednoduchý jev, můžeme rozlišovat a určovat především výšku vzlinutí, rychlost vzlinutí a množství vzlinající vody.

Výška vzlinutí je v rovnováze s kapilárním tlakem P . Maximální výšku vzlinutí, kterou značíme h , můžeme vypočítat z podmínky rovnováhy mezi zmenšením kohesního tlaku v kapiláře a hydrostatického tlaku vzlinutí kapaliny. Obecně se maximální výška vzlinutí určuje ze vztahu:

$$h = \frac{2 \times \sigma \times \cos \vartheta}{g \times r \times \rho_m} \quad [\text{m}] \quad (1.13)$$

kde: σpovrchové napětí kapaliny [kg/m]

ϑkrajní úhel [-]

r poloměr kapiláry [m]

ρ_mměrná hmotnost kapaliny [kg/m³]

ggravitační zrychlení [m/s²]

Rychlost vzlinutí pro pórobeton je mnohem menší, než třeba pro cihlu pálenou. Je to dáno zejména díky samotné pórovitosti, proto se pórobeton, co se týče vzlinutí, chová daleko lépe, než jiné stavební látky. Kulové makropóry přerušují spojení tenkých kapilár a to způsobuje zhoršení možnosti vzlínavosti v materiálu. Tato vlastnost však také způsobuje to, že vysychání pórobetonu zabere více času, než vysychání pálených cihel. Pro výpočet rychlosti vzlinutí se používá vzorec:

$$v = \frac{r \times \sigma \times \cos \vartheta}{4 \times \eta \times h} \quad [\text{m/s}] \quad (1.14)$$

kde: r poloměr kapiláry [m]
 σ povrchové napětí kapaliny [kg/m]
 ϑ krajní úhel [-]
 η dynamická viskozita kapaliny [kg.m⁻².s]
 h výška vzlinutí [m]

Množství zvlínající vody je závislé na průměrné průřezové ploše ponořených vzorků. Tento jev se sleduje po dobu 72 hodin. Pro pórobeton se udává množství zvlínající vody za 72 hodin 2,5 až 3 g.mm⁻² .10⁻². [1][9][10][13]

1.3.2. Difuze vodní páry

Jako difuzi vodní páry ve stavebnictví uvažujeme transport molekul vodní páry ve vzduchu, nebo v pórech, které jsou také vyplněné vzduchem. K difuzi vodních par dochází v důsledku rozdílu parciálních (částečných) tlaků. Molekuly vody ve vzduchu se chaoticky pohybují do všech směrů. Tam, kde je vyšší koncentrace vodní páry, se šíří více molekul, než na místo, kde je koncentrace vodních par nižší. Pro stavebnictví je předpoklad dvou sousedících prostředí, které mají různé počáteční parciální tlaky, zejména venkovní a vnitřní prostředí. To znamená, že venkovní (obvodová) zeď klade největší odpor molekulám vody. Čím je zeď tlustší a čím menší je součinitel difuzního prostupu, tím větší překážku staví molekulám do cesty. Molekuly se pohybují náhodně, ale hnací silou je právě již zmíněný rozdíl parciálních tlaků. Pokud tedy dojde ke srovnání tlaků, znamená to, že pohyb molekul ustává a tím ustává difuze.

Schopnost materiálu propouštět vodní páru vyjadřuje faktor difuzního odporu. Ten vyjadřuje, kolikrát je difuzní odpor daná látky větší, než vzduchová vrstva o stejné tloušťce, jakou má zkoumaný materiál při úvaze stejné teploty. Z této poučky lze určit, že difuzní faktor odporu vzduchu $\mu = 1$. Obecní vztah se určuje takto:

$$\mu = (\delta \times N)^{-1} \quad [-] \quad (1.15)$$

kde: δ součinitel difuze vodní páry [s]
 N teplotní difuzní funkce [s⁻¹]

Za určitých podmínek mohou vodní páry v konstrukci kondenzovat, případně nezmění své skupenství a změní se na led nebo námrazu. Tento jev je v konstrukci nežádoucí a vhodnou skladbou konstrukce se snažíme zamezit tomuto jevu. [1][13][14]

1.3.3. Kondenzace vodní páry

Kondenzace vodní páry není vůbec lehké a srozumitelné téma. Při kondenzaci musíme brát v potaz spousty dějů, které jsou těžko srozumitelné pro laiky, ale v některých případech i pro stavební odborníky. Kondenzace přitom může způsobovat značné potíže při vzniku jak na povrchu, tak uvnitř konstrukce.

Aby vznikala kondenzace, je potřeba vodní pára. Ta má mnoho zdrojů výskytu. Zdrojem je samotný živý organismus, dýchání lidí a zvířat, odpařování rostlin. Další zdroj je mokré mytí, nebo sušení prádla uvnitř budovy, vaření, sprchování, atd.

Kondenzace znamená vysrážení vodní páry na vodu. Vysrážení proběhne buď na povrchu konstrukce, nebo uvnitř konstrukce. Vzduch je směs suchého vzduchu a vodní páry. Jeho vlhkost udáváme jako relativní vlhkost vzduchu v procentech. Procento znázorňuje, kolik procent vlhkosti je obsaženo ve vzduchu, kdy 100% je zcela nasycený vzduch. V tu chvíli už vzduch nemůže pojmout další vlhkost. Pokud parciální tlak vodní páry dosáhne maximální hodnoty (P_p''), dosahuje vzduch tzv. rosného bodu. Další vodní páru není schopen vzduch pojmout a tak dochází ke kondenzaci. Vysrážení vodní páry na vodu má podobu mlhy, kapek vody, jinovatky apod. Jedná se o povrchovou kondenzaci vody a dochází k ní v případě, že teplota konstrukce, na které se projeví kondenzace, má menší teplotu, než je teplota rosného bodu vzduchu.

Relativní vlhkost vzduchu rovna 100% odpovídá stavu rovnosti tlaků $P_p = P_p''$. Zvýšení hodnoty parciálních tlaku, nebo poklesu teploty, znamená vznik kondenzace. Relativní vlhkost vzduchu je tedy poměr parciálního tlaku vodní páry a parciálního tlaku nasycené vodní páry.

$$\varphi = \left(\frac{P_p}{P_p''} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (1.16)$$

kde: P_pparciální (částečný) tlak vodní páry [Pa]

P_p''parciální (částečný) tlak nasycené vodní páry [Pa]

Relativní vlhkost je tedy různá pro určité hodnoty P_p (při stejné tenzi), pro různé teploty vzduchu. V následující tabulce jsou uvedené relativní vlhkosti vzduchu a jeho teplota. Můžeme tedy vyčíst množství vodní páry ve vzduchu podle podmínek, které v prostoru naměříme.

Tab. 4) Množství vodní páry ve vzduchu při různé relativní vlhkosti [13]

Relativní vlhkost vzduchu	Množství vodní páry ve vzduchu [g.m ⁻³] při teplotách vzduchu [°C]						
	φ[%]	-20	-10	0	10	20	30
30		0,3	0,7	1,4	2,8	5,2	9
40		0,35	0,9	1,9	3,8	6,9	12
50		0,45	1,1	2,4	4,7	8,7	15
60		0,54	1,3	2,9	5,6	10	18
70		0,63	1,5	3,4	6,6	12	21

Kondenzace vodních par nastává i u homogenních jednovrstvých konstrukcí. Zde není účinek tak podstatný a lze ho zpravidla zanedbat. U vícevrstvých konstrukcí je problém kondenzace nebezpečnější z hlediska degradace konstrukce. Proto je potřeba správný a ověřený návrh skladby konstrukce pro eliminování kondenzace uvnitř této konstrukce.

[1][13][15]

1.3.4. Transport vody dalšími mechanismy

Dalším způsobem transportu vody je pomocí elektrického pole. Ve vztlínající vodě se ionty rozpustných solí začínají rozdílně pohybovat, seskupují se při hranici odpařování a odtud putují zpět k patě zdiva, kde je zóna s roztokem, který je méně koncentrovaný. Tento pohyb iontů ve zdivu vytváří elektrické pole. Tvar tohoto pole ve vlhkém zdivu, polarita a spád závisí na směru, rychlosti, chemickém složení a množstvím vlhkosti, která se pohybuje ve zdivu. Pohyblivost je vyšší u záporných aniontů. Pouze u opravdu starých a zavlhlých staveb nacházíme kladný pól v zóně odpařování a níže u paty zdiva, či v blízkosti zeminy se nachází záporný pól. Další chemický proces je styk dvou materiálů s rozdílnou hodnotou pH. Elektrické napětí

proudí z materiálu, který má vyšší hodnotu pH, do materiálu s nižší hodnotou pH. Podle Nernsta se napětí určí ze vztahu:

$$U = 0,058\Delta pH \quad [V] \quad (1.17)$$

kde: ΔpHrozdíl pH materiálů [-]

Ve stavebních konstrukcích vznikají takzvané bludné elektrické proudy. Tyto proudy vznikají zejména ve městech vlivem trolejového vedení, nebo v blízkosti elektrifikovaných tratí. Bludné elektrické proudy také ovlivňují elektrické pole.

Dalším zdrojem elektrických galvanických článků jsou kovové části, které jsou v místě vlhké konstrukce a vlivem vlhkosti korodují. Tím vzniká napětí, které ovlivňuje pohyb vody. Toto napětí dosahuje okolo 1000mV.

Pohyb vlhkosti je možný i v příčném směru. Ze strany zdi, kde působí vyšší teplota, dochází k difuzi ve směru k místu, kde je teplota nižší. Tento jev může nastat i v případě, kdy na jedné straně je místo s vyšším parciálním tlakem a difuze putuje na stranu s nižším parciálním tlakem. Pro tento pohyb je potřeba, aby kapiláry a póry byly vyplněny vzduchem anebo nebyly zcela zaplněny vodou. Difuze obecně působí v kapilárách a pórech s větším průměrem.

V případě, kdy jsou kapiláry a póry zcela zaplněny vodou, přichází druhá síla, která působí v příčném směru. Nazývá se termoosmóza. Termoosmóza převádí vodu ze strany s nižší teplotou na stranu s vyšší teplotou. Působí tedy opačně oproti difuzi. Termoosmóza působí v nejužších kapilárách.

Jak difuze tak termoosmóza působí zároveň. Pohyb se tedy sčítá a převažující děj určuje pohyb vlhkosti a vody v příčném směru. [1][13]

2. ODSTRAŇOVÁNÍ VLHKOSTI ZE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

2.1. Metody vysoušení stavebních látek

Voda a vlhkost obecně vstupuje do zdiva mnoha způsoby. Způsobuje nárůst vlhkosti zdiva a tím způsobuje problémy v oblasti statické (únosnost), fyzikální (součinitel tepelné vodivosti) tak i v estetické a hygienické (výkvět solí, plíseň). Z předešlých kapitol víme, že vlhkost se dostává do konstrukce v podobě kapaliny i v podobě plynu, jako vodní pára. Hlavními viníky vlhkosti v materiálu jsou srážkové vody, kondenzované, tlakové vztlínající a vody, které pronikají do konstrukce vinou špatné, či poničené hydroizolace.

Proces odstraňování vlhkosti ve zdivu se nazývá sanace vlhkého zdiva. Rozděluje se na přímé a nepřímé metody.

Mezi přímé metody řadíme například provádění hydroizolací, vzduchových mezer, nebo napouštění konstrukce chemickými odpuzovači vlhkosti. Jedná se tedy o metody přímo prováděné během výstavby objektu.

Jako nepřímé metody označujeme takové opatření, které lze udělat i dodatečně a má za úkol spíše vodu nepustit ke konstrukci, než jí odolávat, případně se vlhkosti už zbavovat. Pro příklad se jedná třeba o svažování terénu směrem od objektu, použití vysoušečů, či použití drenáže.

Úspěšná sanace však spočívá v provedení správné a nejúčinnější kombinace přímé a nepřímé metody sanace vlhkého zdiva. Důležité při provádění sanace je si uvědomit, že se vlhkost v materiálu rychle sníží a zcela odstraní. Dojde pouze k snížení hodnoty vlhkosti. O jak velké snížení se bude jednat závisí na vlastnostech daného materiálu, na teplotě a na vlhkosti vzduchu. Jedná se tedy o postupný a dlouhodobý proces.

Následující odstavce se budou věnovat pouze vybrané části nepřímé sanační metody, konkrétně na metody vysoušení zdiva. [1][13][16][17][18]

2.1.1. Samovolné vysychání

Vysychání je ovlivněno podobně, jako pohyb vlhkosti. Jedná se především o teplotu a vlhkost vzduchu a dále na vlastnostech samotného materiálu. Jako vysychání

chápeme přesun kapaliny z póru materiálu do okolního prostředí (atmosféry). Celý proces je trochu složitější a zahrnuje kromě transferu kapaliny i přeměnu kapalného skupenství vlhkosti na plynné skupenství a tím spojen pohyb plynné látky z povrchu materiálu do okolního prostředí, který nazýváme konvekčně difuzní pohyb par.

Rychlost vysychání se dělí na dvě stádia. V prvním stádiu je rychlost konstantní. Označujeme tedy toto stádium za období konstantní rychlosti vysychání. Tato rychlost se u velké většiny porézních materiálů rovná vypařování z otevřené vodní plochy za stejných podmínek. Ve druhé fázi začíná rychlost vysychání klesat a nazýváme toto stádium obdobím klesající rychlosti vysychání. Rychlost ve druhé fázi je limitovaná rychlostí toku v nenasyceném prostředí. Jako prostředí uvažujeme vnitřek porézní pevné látky.

Zjednodušený odhad doby samovolného vysoušení materiálu do rovnovážné vlhkosti lze použít tzv. Cadierguesův vztah. Ten vypadá takto: [1][13][19]

$$T = k \times b^2 \quad [\text{dny}] \quad (1.17)$$

kde: Tdoba nutná pro vyschnutí stavebního materiálu [dny]

kkoeficient odpařování [-]

btloušťka zdiva [cm]

2.1.2. Elektrické vysoušeče

Používají se pro zkrácení doby vysoušení. Znovu se musí zdůraznit skutečnost, že žádný vysoušeč není všemocný a samotnou dobu procesu vysychání sice urychlí, ale nejedná se o závratné snížení potřebné doby. I vysoušeče mají svá úskalí, je třeba zvolit správný typ vysoušeče a jeho správné nastavení, aby došlo k efektivnímu vysušování a nedošlo k vzniku tzv. kavít. Kavity jsou povrchové dutinky, které mohou vzniknout během vysoušení. Způsobují urychlení vysoušení, avšak pouze na povrchu materiálu, zbytek vlhkosti se pak drží pořád uvnitř materiálu. Tyto dutinky prodlužují dobu vysoušení, protože mají v sobě vzduch a přes něj se vlhkost obtížně dostává. Dále pak mohou způsobit riziko vzniku trhlin v materiálu. Z tohoto důvodu je důležité správné nastavení vysoušeče a správný typ vysoušeče.

Mezi nejznámější vysoušeče řadíme tři způsoby fungování vysoušeče. Jedná se o účinek na základě ohřívání a větrání (teplometné vysoušeče), odvlhčování na principu adsorpce (adsorpční odvlhčovače) a odvlhčování pomocí kondenzace (kondenzační odvlhčovače). [1][13][18]

2.1.2.1. Teplometné vysoušeče

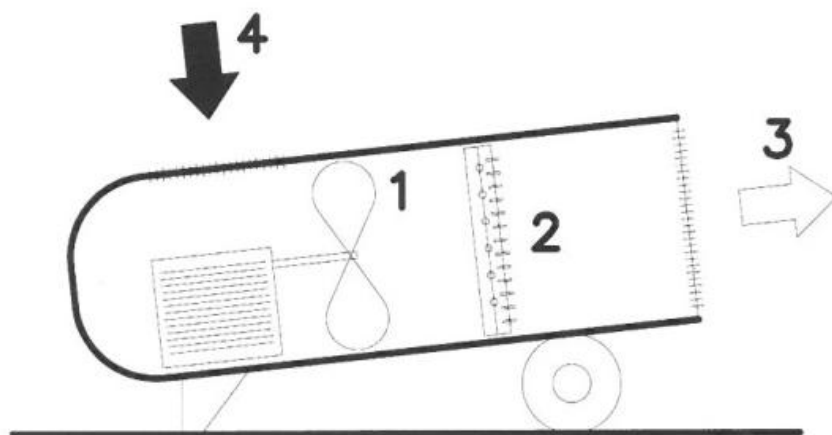
Teplometné vysoušeče fungují na starém a známém fyzikálním principu. Ten poukazuje na fakt, že horký vzduch pojme daleko více vlhkosti, než vzduch studený. K tomu používáme zařízení, které vhání horký vzduch do místnosti spolu s dostatečným větráním. Větrání je nedílnou součástí využívání teplometných vysoušečů, neboť nevýhodou této metody je možnost vysrážení vodní páry. Vodní pára obsažená v horkém vzduchu může kondenzovat na okolních plochách a způsobit problémy. Zkondenzování zabrání již zmíněné větrání.

Pro nejvyšší účinnost vženeme do místnosti maximální možnou teplotu vzduchu a následně místnost rychle vyvětráme. Tento postup můžeme mnohokrát opakovat, ale je nevýhodou je jeho vysoká energetická náročnost.

Tento druh vysoušečů používáme především tam, kde nelze použít kondenzační vysoušeče, v případě vysoušení:

- prostory, které nelze uzavřít (atria, chodby, atd.),
- příliš velké místnosti (sály, sklady, atd.),
- teplometný vysoušeč musí být od zdi minimálně 700 mm (pokud proud horkého vzduchu míří přímo na zeď, musí se po 30 minutách vysoušeč posunout dále),
- větrání místnosti musí být mimo budovu do volného prostoru
- nepoužívat v jedné místnosti horkovzdušné a kondenzační vysoušeče s otevřeným plamenem.

[1][13][18]



Obr.1) Teplometrní vysoušeč [1]: 1 – ventilátor, 2 – el. ohříváč,
3 – horký vzduch, 4 – studený vzduch

2.1.2.2. Kondenzační odvlhčovače

Tento druh vysoušeče pracuje na principu kondenzace vodních par. Přístroj, umístěný v místnosti, přivádí vlhký vzduch pomocí ventilátoru do výparníku. Zde je vzduch chlazen a ve chvíli, kdy dosáhne teplota rosného bodu, se začne vodní pára srážet v kapkách. Kapky jsou následně odváděny do nádoby nebo hadičkou do kanalizace. Chladný a vysušený vzduch je znovu ohřát teplem, které vzniká při kondenzaci a je znovu vháněn zpět do místnosti. Díky opakování cirkulace vzduchu přístrojem se relativní vlhkost vzduchu v místnosti snižuje a dochází k velmi rychlému, ale šetrnému a jemnému vysoušení.

Optimálně bývá výkon kondenzačních odvlhčovačů při teplotě nad 15 °C a 10 až 50 litrů kondenzátu za jeden den. Při nižších teplotách se doporučuje využít přídavného vytápění k dosažení optimální teploty 15 °C.

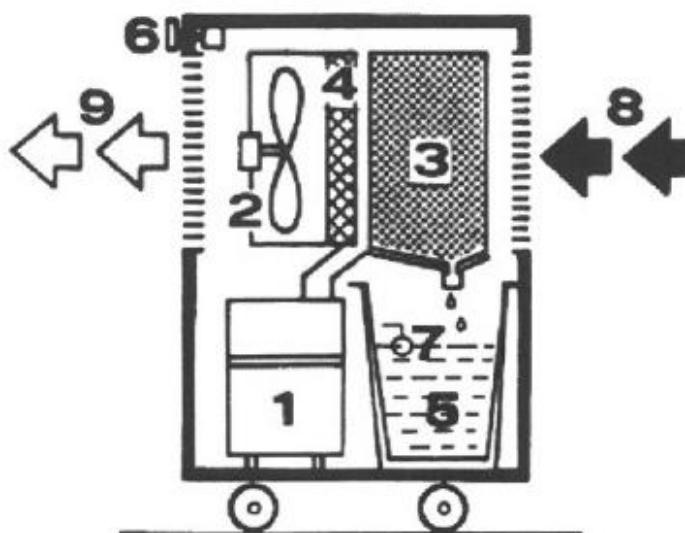
Je potřeba, aby ovlhčování probíhalo v uzavřené místnosti. Musí se zamezit dodávce nového čerstvého vzduchu. Bez těchto opatření není možné snížit relativní vlhkost v místnosti a celý proces je tedy nefunkční.

Kondenzační odvlhčovače je vhodné použít pro prostory zasažené vodou (vodní havárie, záplavy, atd.). Další prostory, kde je vhodné využít tento druh odvlhčovače, jsou technologické prostory, kde se vlivem procesů vyskytuje pára a vlhkost (prádely, pekárny, atd.). Jako další prostory můžeme uvést sauny, bazény a lázně, sprchové prostory, sušárny a všude, kde je potřeba a žádoucí udržovat určitou vlhkost.

Pro použití kondenzačních odvlhčovačů platí následující pravidla:

- před samotným vysoušením je třeba odstranit veškeré nečistoty způsobené vodní havárií, či povodní,
- zvolit správný vysoušeč, či kombinaci vysoušečů (velikost nádržky, možnost odvodu zkondenzované vody do kanalizace, výkon, atd.),
- zabránit přístupu nového čerstvého vzduchu (utěsnit otvory, zavřít okna, atd.),
- udržovat teplotu vzduchu v místnosti minimálně 15 °C (čím vyšší teplota vzduchu v místnosti, tím rychleji probíhá odpařování),
- nepřetržitý chod vysoušeče minimálně 3 až 4 dny,
- pokud je objekt podsklepen, začíná se vysoušet od nejspodnějších místností.

[1][13][18]



Obr. 2) Kondenzační odvlhčovač [1]: 1 – kompresor, 2 – ventilátor, 3 – výparník, 4 – kondenzátor, 5 – nádoba na vodu, 6 – hygroskop, 7 – plovák, 8 – vlhký vzduch, 9 – suchý vzduch

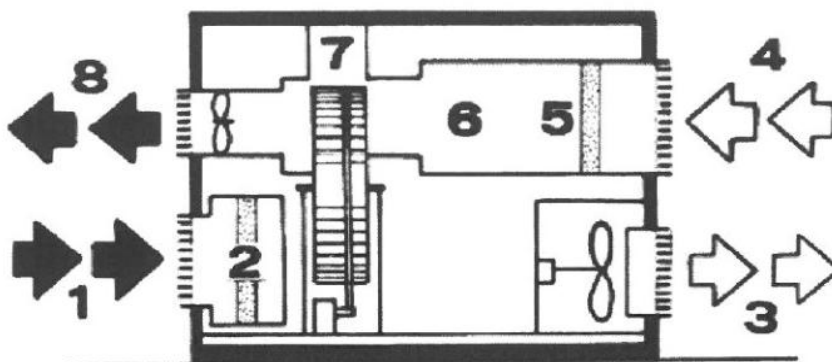
2.1.2.3. Adsorpční odvlhčovače

Adsorpční odvlhčovače pracují s adsorpčními vlastnostmi různých materiálů. Vlhký vzduch z místnosti je přiváděn do odvlhčovače a prochází pórovitým, chemicky impregnovaným materiálem, který váže vlhkost (např. silikagel). Ve chvíli, kdy je materiál zcela nasycen vlhkostí, je třeba ho regenerovat. Regenerace probíhá profouknutím horkým vzduchem, který odpaří vlhkost. Po regeneraci může materiál znovu nasávat vlhkost. Vysoušení a regenerace probíhá současně, takže vysoušeč může běžet bez přerušení. Tyto odvlhčovače mají daleko větší výkon, zvládají adsorbovat i 2000 l za den. Zařízení pracuje plynule a při poklesu relativní vlhkosti v místnosti dochází k dalšímu vypařování z konstrukce. Intenzita procesu závisí na teplotě v místnosti, na použitých materiálech a na vlhkosti vzduchu v místnosti. Odvlhčovač každopádně vytvoří rovnováhu mezi poměrně stabilní vlhkostí a teplotou v místnosti.

Výhoda těchto odvlhčovačů spočívá v jejich výkonu i při nízkých teplotách a nízké relativní vlhkosti v místnosti. Vyčnívají svoji jednoduchou konstrukcí, díky které mají vysokou spolehlivost, dále mají vysokou kapacitu a hlavně vydatné sušení.

Adsorpční odvlhčovače se používají ve farmaceutickém, či potravinářském průmyslu, ve sportovních halách, v trafostanicích, vodárnách a dalších jiných odvětvích.

Obecné zásady pro použití adsorpčních odvlhčovačů jsou stejné, jako v případě použití kondenzačních odvlhčovačů. [1][13][18]



Obr. 3) Adsorpční odvlhčovač [1]: 1 – vstup vlhkého vzduchu, 2 – filtr, 3 – výstup odvlhčeného vzduchu, 4 – vstup regeneračního vzduchu, 5 – filtr, 6 – ohřívač regeneračního vzduchu, 7 – adsorpční rotor, 8 – výstup regeneračního vzduchu

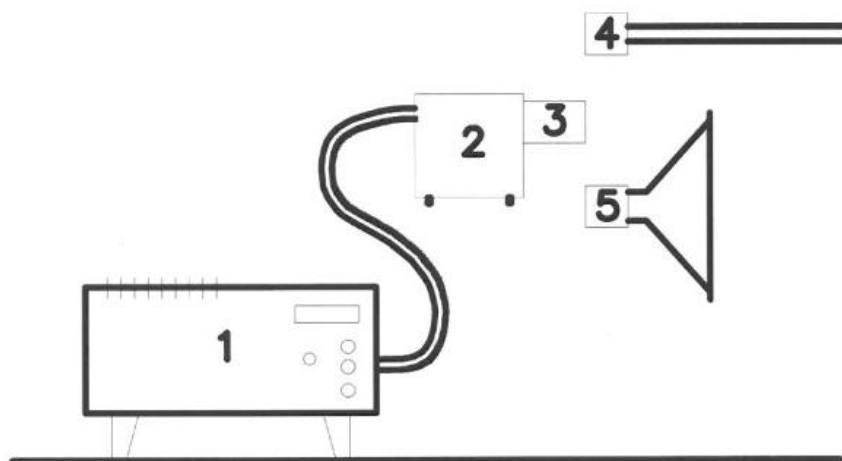
2.1.3. Mikrovlnné záření

Použití mikrovlnných vysoušečů je v dnešní době velmi výkonné. Dle mnohých zkušeností lze potvrdit, že za pomoci šesti zářičů lze odstranit z cihelného zdiva za jeden den až 1500 l. Principiálně mikrovlnné vysoušení funguje na fyzikálním procesu, při kterém působí mikrovlny na molekuly vody tak, že vodu zahřívají a ta se pak vypařuje z materiálu. Na samotném začátku působí mikrovlny na povrchu a s přibývajícím dobou procesu začínají mikrovlny působit i uvnitř materiálu. Rychlost vysoušení je tedy závislá na velikosti vlhkost, tloušťce zdiva, výkonu přístroje, druh zdiva a dalších parametrech.

Výhodou mikrovlnného záření je rychlost vysoušení. Oproti předchozím metodám se jedná o daleko rychlejší proces, bohužel tento proces je značně složitý a doposud ne zcela zmapovaný. Nevýhodou je cenová náročnost procesu a také bezpečnost práce s vysoušečem. Mikrovlny působí nepříznivě na živou tkáň, a proto jsou udány přípustné hodnoty jednorázového ozáření pro pracovníky ve vyhlášce MZ ČR č.408/1990 Sb.

I při tyto metodě je možná kondenzace vodní páry na povrchu materiálu, a tak je důležité vysoušené prostory účinně a dostatečně větrat, nebo použít absorpční odvlhčovače a zvýšenou vlhkost zachytit.

Teorie a využití mikrovlnného záření bude podrobněji probrána v následujících kapitolách. [1][13][17]

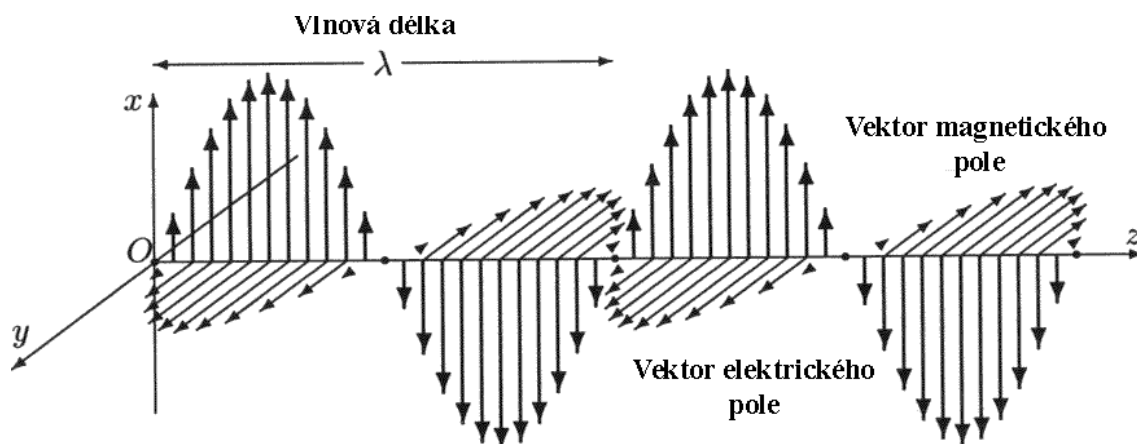


Obr.4) Mikrovlnný vysoušeč [1]: 1 – zdroj mikrovlnného záření, 2 – generátor mikrovln, 3 – vlnovod, 4 – tyčová anténa, 5 – trychtýřová anténa

3. POUŽITÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ PRO VYSOUŠENÉ STAVEBNÍCH LÁTEK

3.1. Teorie mikrovlnného záření

Historicky se považuje jako základ pro mikrovlnné záření práce Jamese Clerka Maxwella z roku 1873. Maxwell matematicky vyjádřil hypotézu o šíření elektromagnetických vln, dále pak poukázal na fakt, že i světlo se chová jako elektromagnetická vln. Až mezi rokem 1887 a 1891 se podařilo Maxwellovu hypotézu ověřit experimentem. Byl to Heinrich Hertz, kdo se o tento experiment postaral. Od této doby se otevřelo nové odvětví pro výzkum. Vědci se zabývali elektromagnetickým zářením a snažili se vyrobit menší a menší vlny. První vlny o délce 3 mm vyrobil Petr Lebeděvov a tím otevřel dveře do nové oblasti elektromagnetického záření. Díky zmenšování vlnových délek přišel na svět nový vynález jménem Magnetron. Magnetron dal základ novému využití mikrovln a přinesl lidstvu radar. Od radaru se mikrovlny začaly využívat v mnoha odvětví průmyslu až po domácnosti v podobě mikrovlnné trouby. [20][21]



Obr.5) Schéma elektromagnetické vlny délky [22]: λ – elektrická složka (x) a magnetická složka (y) vlnění

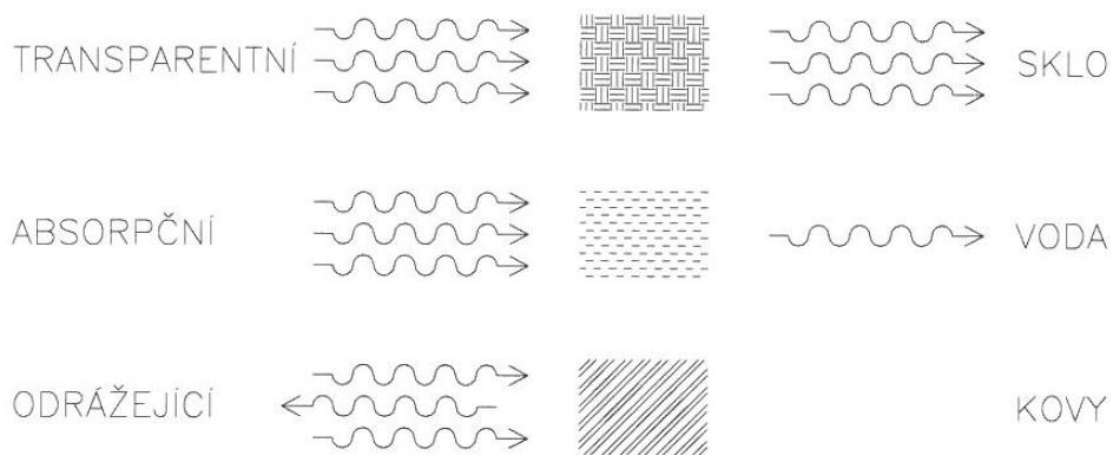
Mikrovlnné záření už v názvu napovídá, že forma šíření bude v podobě vln. Tyto vlny se šíří rychlostí světla od zdroje mikrovlnného záření a jejich frekvence se pohybuje v rozmezí 300 MHz až 300 GHz. Tato frekvence odpovídá vlnové délce o velikosti 1 m až 1 mm. Předpokládá se sinusový průběh vln, kde frekvence vyjadřuje četnost střídání vln a je určitá vlnová délka.

Pro účely v průmyslu a tím i ve stavební praxi je globálně určená frekvence 2,45 GHz. Tato frekvence odpovídá vlnové délce 12,2 cm a je vybrána, protože při této frekvenci je předpoklad vyhnutí se telekomunikačním frekvencím a tím rušením systému.

Vznik mikrovln probíhá generátorem, který přemění elektrickou energii na energii mikrovlnou. V generátoru se tvoří vysokonapěťové elektronky. Rozlišujeme dva typy těchto elektronek dle jejich frekvence. Jedná se buď o magnetrony, anebo o klystrony. Vlnovodem putují mikrovlny do antény. Z prostoru antén se vytváří prostorové pole. Toto pole je místně i časové proměnné, vytvořeno odrazem mikrovln od kovových částí antén. Mikrovlnné záření je pak částečně absorbováno, odraženo, nebo část záření prostupuje. Díky tomuto jevu můžeme rozdělit materiály na tři skupiny podle toho, jak budou reagovat na výskyt mikrovln:

- transparentní – materiály, kterými záření proniká (např. sklo),
- absorpční – materiály, které záření pohlcují (např. voda),
- odrážející – materiály, od kterých se záření odráží (např. kovy).

[1][13][22]



Obr.6) Interakce mikrovlnného záření se stavebními materiály [1]

3.2. Šíření mikrovlnného záření

Šíření elektromagnetických vln je ovlivňováno mnoha faktory, které není možné zohlednit najednou. V celém frekvenčním pásmu se různě projevují v závislosti na poloze a času. Nejvýznamnější faktor ovlivňující šíření mikrovlnného záření je odrazivost materiálu.

Rychlost šíření elektromagnetické vlny se pro vakuum značí c a výsledná rychlost je konstantních $3,0 \times 10^8$ m/s. V prostředí nevodivém homogenním izotropním látkovém se značí v a lze určit ze vztahu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad [\text{m/s}] \quad (1.18)$$

kde: μ_rrelativní permeabilita prostředí (uvažuje se rovna 1) [-]

ε_rje relativní permitivita [-]

Se šířením elektromagnetického záření je spojena i elektromagnetická energie. Pokud se elektromagnetická vlna šíří prostorem, nese si s sebou i energii. Tuto energii můžeme dle Maxwellovy teorie popsat, za předpokladu že se jedná o časově proměnné elektrické pole, jako změnu energie obsažené ve zvolené části objemu elektromagnetického pole, jehož změny se řítí určitou rychlostí v v prostředí.

[13][23][30]

3.3. Použití mikrovlnného záření ve stavebnictví

Už víme, že pro stavebnictví se využívá mikrovlnné záření o frekvenci 2,45 GHz. Jedná se o stejnou frekvenci, jakou disponuje i mikrovlnná trouba, která se vyskytuje ve většině domácností. Hlavní využití mikrovln pro stavebnictví je jejich účinek s vodou, tedy zejména vypařování vlivem ohřevu vody. Díky této vlastnosti se mikrovlny využívají k vysoušení, dezinfekci, nebo k měření vlhkosti materiálu.

[1][13][26]

3.3.1. Mikrovlnné vysoušecí metody

Nejčastější využití mikrovlnného záření ve stavebnictví bývá v odvětví sterilizace a vysoušení dřevěných konstrukcí. Pomocí mikrovln se šetrně a velmi účinně likvidují plísňe, houby a dřevokazný hmyz. Mikrovlny přehřejí organismus a jsou

schopné v krátké době zahubit veškeré vývojová stádia organismu. Využívá se pro tuto činnost mikrovlnné záření o menším výkonu a také se používá nižší doba vysoušení. Jednotlivé teploty pro vyhubení organismu se liší. Pro dřevokazný hmyz se tyto teploty pohybují v rozmezí 50 až 60 °C. Pro houby jsou teploty o něco vyšší a jsou v rozmezí 80 až 100 °C. V obou případech je účinek během několika hodin. Základ pro úspěch je dostatečná doba ozařování. Prvek se musí dostatečně prohřát, aby byl zaručen pozitivní výsledek procesu, celková vlhkost dřevěného prvku musí klesnout pod hodnotu 20%. Pod touto hranicí se houby dále nerozmnožují. Velký pozor se upíná k dostatečné kontrole celého prvku. Před zahájením ozařování je nutné se přesvědčit o tom, zda se v daném prvku nevyskytují kovové prvky. Interakce mikrovln s kovovými prvky v dřevěném materiálu by mohla způsobit vzplanutí dřevěného prvku.

Dalším využití mikrovln ve stavebnictví je v případě vodních havárií, zejména po povodních. Mikrovlnné záření se ukázalo jako šetrná a účinná metoda vysoušení vzácných a důležitých dokumentů po zásahu záplav. Problém byla opět interakce s kovovými prvky (pozlacené texty, spony, atd.), kdy hrozilo vzplanutí dokumentu. Proto bylo, pro využití vysoušení těchto archiválií, použito mikrovlnné záření o malém výkonu. Celý proces je náročně zdoluhavý, ale jedná se o šetrnou formu vysoušení, která zachrání většinu dokumentů.

V případě vysoušení a sterilizaci stavebních konstrukcí a materiálů se vrháme do nepříliš prozkoumané oblasti. V současné době probíhá řada výzkumů a ověřuje se mnoho teorií, které mají dopomoci k využívání této technologie, co možná nejefektivněji a nejšetrněji.

Obecně se ve stavební praxi používá několik druhů zařízení. Prakticky je důležité správné nastavení přístroje. Vysoušení musí být šetrné, nesmí docházet k příliš rychlému vysoušení. Nově používané antény pro mikrovlnné zařízení zvyšuje efektivitu sušení a také zvyšuje působící plochu ozařování. Antény rozeznáváme ve dvou typech, trychtýřové a tyčové zásuvné antény. Tato práce se zabývá využitím trychtýřové antény na proces vysoušení. [1][13][26][27]

3.3.2. Mikrovlnné měření vlhkosti zdiva a stavebních látek

Měření míry vlhkosti stavebních látek je velmi důležité. Určuje míru využitelnosti materiálu a poukazuje na možné degradace vlastností. Požadavek na

zjištění míry vlhkosti stavebního materiálu je především v rychlosti určení, nedestruktivnost a hlavně velká přesnost určení.

Pokud mluvíme o určení vlhkosti, jedná se buď o destruktivní, nebo nedestruktivní metody. Při destruktivní zkoušce je potřeba odebrat vzorek zkoušeného materiálu. U nedestruktivní není potřeba odebírat vzorky. Čidlo je umístěné přímo na makroskopickém povrchu zkoušeného materiálu. Při použití mikrovlnného záření k určování vlhkosti látky nedochází k odběru vzorků, jedná se tedy o nedestruktivní metodu.

Mikrovlnné záření je považováno za nepřímou metodu určení vlhkosti látky. Nepřímé metody sledují určitou fyzikální veličinu, která je přímo funkčně závislá na obsahu vody ve zkoumané látce. Celý proces tedy staví na vlivu vlhkosti na útlum mikrovlnného záření při průchodu pórovitým prostředím. Znamená to, že se zjišťuje poměr mezi dielektrickou konstantou vody a materiálem. Další variantou je vyhodnocení odraženého mikrovlnného signálu od pórovité látky.

Dále rozeznáváme tři hlavní umístění zkoumané látky oproti zdroji mikrovlnného záření. Jedná se o:

- vlnododové metody,
- rezonátorové metody,
- metody měření ve volném prostoru.

Z pohledu stavební praxe je nejvhodnější metoda měření ve volném prostoru, a proto se dále budeme zabývat pouze touto metodou. [25][28][29]

3.3.2.1. Metody měření ve volném prostoru

Jako první zmíníme klasické mikrovlnné měřicí linky. Tyto linky byly vyvíjeny v Československu v šedesátých letech. Výsledkem vývoje se stal měřič firmy Tesla Pardubice s názvem MV – 1. Měřič byl vyroben pro bezkontaktní měření vlhkosti. Výkon měřiče byl 10 mW a frekvence 9,6 GHz. Takto malý výkon měřiče značně limitoval měření a to byl důvod, proč měřič byl používán zejména v laboratorních podmínkách na tenké vzorky.

Jako nástupce a další možnosti měření jsou novodobé mikrovlnné měřicí linky. Ta se dělí na dvě části. První je vysílací část. Zjednodušeně se v této části nachází generátor mikrovlnného záření a vysílací anténa. V druhé části, která se nazývá přijímací, se nachází přijímací anténa a detektor mikrovlnného záření, který je napojen

na vyhodnocovací zařízení. Autoři tohoto zařízení konstatují, že po laboratorních testech je možné toto zařízení používat k určení vlhkosti stavebních látek.

Mikrovlnná měřicí linka s Gunnovou diodou byla vynalezena Ústavem pozemního stavitelství na VUT v Brně ve spolupráci s FEI VUT a SVVÚ VUT v Brně. Sestava je velmi podobná novodobé mikrovlnné měřicí lince, je ovšem doplněna o Gunnovou diodu. Tato linka prošla testy a byla použita pro určení vlhkosti např. vstupní suroviny pro výrobu pórobetonu.

Nejmodernější přístroje využívají mikrovlnné záření pro určení vlhkosti materiálu trochu jiným způsobem. Použitím vnějšího elektromagnetického pole a zvyšováním jeho frekvence dochází k narušení vnitřních vazebních sil molekul vody. To způsobuje dielektrické ztráty. Při dostatečném vyzářeném výkonu dochází k zahřátí vody, tím vzniká zvláštní uspořádání molekul a je možné změřit dielektrické ztráty a tím určit vlhkost látky. [25][28][29]

3.4. Působení mikrovlnného záření na živý organismus

Působení mikrovlnného záření na biologickou tkáň je předmětem mnoha studií a výzkumů, nejedná se ovšem o jednoduché a nespekulativní téma. Provádění experimentů se neobejde bez rušivých elementů a díky tomu jsou některé studie protichůdné a navzájem se vylučují. V konečné fázi jsou účinky mikrovlnného záření a jeho absorpce závislé na těchto faktorech:

- dielektrické vlastnosti tkáně,
- geometrický tvar a rozměr tkáně,
- trojrozměrné nehomogenní prostorové rozložení tkáně,
- orientace a polarizace elektromagnetického pole,
- kmitočet elektromagnetického pole,
- podmínky ozáření,
- délka trvání experimentu,
- trvalé ozáření nebo dle časového schématu,
- intenzita magnetického pole.

Literatura toto působení na živou tkáň rozděluje na netepelné a tepelné účinky mikrovlnného záření. Podmínky a popis obou kategorií je uveden v následujících odstavcích. [1][20][24]

3.4.1. Netepelné účinky

V podstatě se jedná o přímé (skutečné) účinky elektromagnetického pole. Při velmi nízké elektromagnetické úrovni nedojde k tak vysoké absorpci a tím pádem ani ke zvýšení teploty biologické tkáně. Nejsou tedy prokázány škodlivé účinky na DNA, enzymy a buňku jako takovou.

Všeobecné studie ale poukazují na fakt, že elektromagnetické pole působí na člověka. Je dokázaná prokazatelně zrychlená reakční doba uživatele mobilního telefonu v průběhu hovoru a i nějakou dobu po ukončení hovoru. Ve studiích a rozbořech se dokola mluví o subjektivních potížích, jako je pocit únavy, nebo zhoršení paměti.

[1][20][24]

3.4.2. Tepelné účinky

Po absorpci vyššího množství elektromagnetické energie dojde ke zvýšení teploty v biologické tkáni. Tento účinek bývá využíván při termoterapiích. Tyto účinky jsou doprovázeny vlastními účinky elektromagnetického pole a díky tomu je obtížné určit a vyhodnotit výsledný efekt tepelných a netepelných účinků.

S tepelnou energií, která je na organismus aplikována vlivem tepelných účinků, si do určité míry umí organismus poradit. Za pomoci termoregulace se ochladí. V ohrožení jsou ovšem části organismu s nízkou mírou prokrvení, protože termoregulace je spojena s mírou prokrvení. Z toho plyne, že mikrovlnné záření ohrožuje nejvíce oči a pohlavní orgány. Oči nepříjemně vysušuje a u pohlavních orgánů mužů způsobuje úbytek spermií.

Díky zkušenostem z experimentu byly vytvořeny hygienické limity a normy pro působení elektromagnetických vln o různých kmitočtech. Tyto normy jsou rozvedeny v následující kapitole. [1][20][24]

3.4.3. Hygienické normy

Na pracovištích a v prostorech s vyšší koncentrací elektromagnetického pole jsou určeny podmínky bezpečnosti práce. Tyto normy určují maximální možné hodnoty intenzity elektrického pole nebo maximální hodnoty absorbovaného (dopadajícího)

výkonu. Na pracovišti pracovníci vnímají výskyt elektromagnetického pole zvýšenou únavou, či vyšším pocitovým teplem. Taková velká intenzita tohoto záření se ovšem vyskytuje pouze ve specializovaných provozech.

Hygienické normy se prozatím liší v jednotlivých zemích, EU se snaží pracovat na jejich sjednocení. Pro srovnání působení elektromagnetického pole na živý organismus se v dnešní době využívají tyto veličiny:

- Hustota dopadajícího výkonu – tato veličina je vhodná pro mikrovlnnou část kmitočtového spektra, je využívána naší státní normou, jednotky W/m^2 ,
- SAR – jde o výkon absorbovaný na 1 kg tkáně, tuto veličinu využívá USA, jednotky W/kg ,
- ARD – výkon absorbovaný na jednotce objemu, jednotka W/m^3 ,
- Intenzita elektrického pole – tato veličina je spíše vhodná pro vyjádření účinků elektromagnetického pole, jednotka V/m ,
- Intenzita magnetického pole – tato veličina je spíše vhodná pro vyjádření účinků elektromagnetického pole, jednotka A/m ,
- Proudová hustota – jedna z dalších často používaných veličin, jednotka A/m^2 .

Vyhláška MMR ČR č. 480/2000 Sb. určuje základní požadavky pro ochranu člověka proti elektromagnetickému záření. Hygienický limit je určen pro elektrická pole, magnetická pole a elektromagnetické záření o frekvenci od 0 Hz až do $1,7 \times 10^{15}$ Hz. Dále se určuje omezení pro expozici osob v elektromagnetickém záření, magnetickém a elektrickém poli o frekvenci 0 Hz až 3×10^{11} Hz. Omezení je po:

- Proudovou hustotu indukovanou v těle,
- Měrnou absorbovanou energii v těle,
- Hustotu zářivého toku elektromagnetické vlny.

V intervalu frekvence 10 MHz až 10 GHz se sleduje SAR. Nejvyšší měrný absorbovaný výkon SAR se přepočítává na celé tělo osoby:

- 0,4 W/kg – pro zaměstnance,
- 0,08 W/kg – pro ostatní osoby.

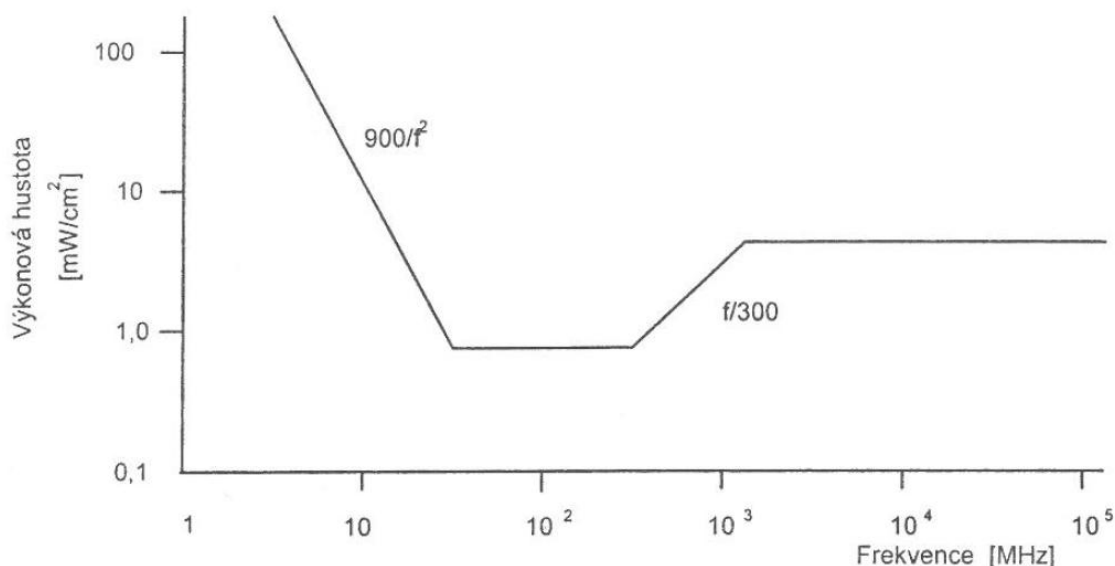
Tyto hodnoty nesmí být překročeny v 6 minutovém intervalu.

Některé firmy, které se zabývají vysoušením zdiva, či likvidaci biotických škůdců pomocí mikrovlnného záření, udávají jako dostačující vzdálenost od antény 4 m. v uzavřených prostorách se ovšem musí počítat s vyšší koncentrací mikrovln, než v otevřeném prostoru. Proto norma pamatuje i na referenční úroveň hustoty zářivého toku v místě generátoru mikrovlnného záření. Pro zaměstnance je tato hodnota 50 W/m^2 a pro ostatní osoby 10 W/m^2 .

Četnost možných sledovaných veličin, nesjednocení norem pro všechny a složitost naší vyhlášky č. 480/2000 Sb. je důkazem toho, jak celý proces elektromagnetického záření je složitý a nikdo nechce podcenit možné následky ozáření. Další důvod je neustálý výzkum problematiky a získávání nových poznatku a skutečností.

Konečné ustanovení je takové, že je známí přímý vliv frekvence 2,45 GHz na ohřev živočišné tkáně až k bodu varu. Tento proces je vysoko nad životu bezpečnou úrovní. Je tedy nebezpečné vystavovat se přímému mikrovlnnému záření záměrně, či po delší dobu.

[1][20][24][26]



Graf 5) Hygienická norma ANSI (USA) [24]

3.5. Vliv mikrovlnného záření na kovové předměty

Obecně je známo, že kovové předměty nemáme vystavovat mikrovlnnému záření. Největším příkladem je fakt, že do mikrovlnné trouby nepatří kovové nádoby. Důvod je prostý. Kov odráží mikrovlny, na tomto faktu funguje i radarová technologie. Při přímém použití mikrovln na kov se tedy mikrovlny odrazí a volné elektrony na povrchu kovového předmětu se mohou rozkmitat. Rozkmitáním může vzniknout elektrický výboj.

Ve stavební praxi tedy musíme dávat pozor na skryté kovové prvky v ozařovaném materiálu. Ozáření dochází tedy k rozkmitání a vzniku elektrického výboje. Je to projev energie, takže vzniká teplo. V případě dřevěného prvku může dojít ke vzplanutí. Zmiňované vzplanutí se šíří od kovového prvku, ohnisko tedy může být uvnitř prvku a detekce mnohem těžší.

Při používání mikrovlnného záření směřujeme proud vln účelně námi voleným směrem. Odraz mikrovln od kovových předmětů mění dráhu šířené vlny a může dojít i k nechtěnému ozařování. Šíření vln je potom chaotické a ne zcela v našich rukách, v tom případě začíná být používání mikrovlnného záření nebezpečné. [27][30][31]

3.6. Interakce mikrovlnného záření s vlhkostí

3.6.1. Vypařování a kapalnění

Vypařováním se nazývá děj, při kterém se kapalná látka mění na látku plynnou. K tomuto přechodu dochází na volném povrchu kapaliny při její libovolné teplotě. Interakcí vody s mikrovlnným zářením se molekuly vody zahřívají. Po zahřátí se molekuly vody uvolňují a tvoří soubor molekul, který nazýváme jako páru.

Kapalnění vzniká na povrchu pevného tělesa, na povrchu kapaliny nebo i ve volném prostoru. Kapalnění popisuje děj, při kterém se spojuje několik molekul páry a tím vznikají drobné kapičky vody. Aby nastal tento děj, je třeba vysoušené prostory dostatečně větrat, aby nedošlo ke kondenzaci na povrchu kapaliny a materiálů. Větráním docílíme pohybu vypařované vodní páry směrem pryč z vysoušeného prostoru, ideálně mimo celý objekt. [1]

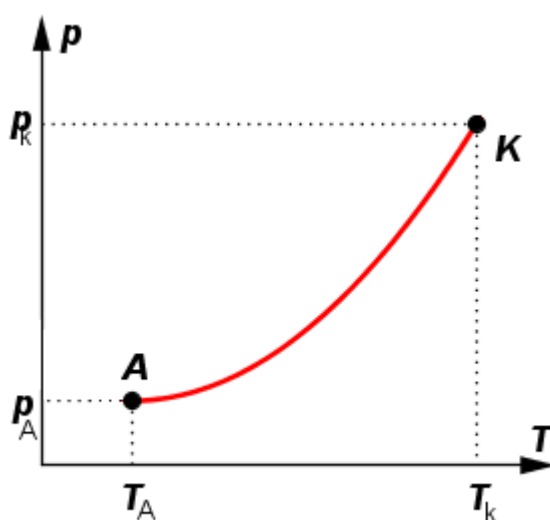
3.6.2. Působení mikrovln na molekuly vody

Při kontaktu mikrovln a vody dochází k rozpořhybování molekul vody. Molekuly do sebe naráží, třou se o sebe a tím vzniká tepelná energie. Tepelná energie způsobuje změnu skupenství vody, tedy z kapalného na plynné. Plynná fáze je vodní pára, která se vypařuje z ozařovaného materiálu. Potřebná doba pro vysoušení je ovlivněna poměrně mnoha parametry. Od druhu materiálu, tloušťky, pórovitost, stupni vlhkosti, atd., [1]

3.6.3. Sytá pára

Sytá pára je rovnovážný proces, při kterém počet molekul vody opouštějící povrch kapaliny je stejný počtu molekul vody vracějící se zpět do kapaliny. To vše za stejný čas. Aby docházelo k tomuto jevu, je potřeba uzavřeného prostoru. V praxi jde tedy o vypařování dostatečného množství kapaliny v dutinových tvarovkách, či v porézním zdivu. Objem kapaliny a páry se tedy přestává měnit, je konstantní (rovnovážný stav).

Tlak syté páry není závislí na objemu vodní páry. Ovlivňuje ho chemické složení a teplota. Tlak syté páry nad kapalinou roste s rostoucí teplotou kapaliny. Zvýšením teploty kapaliny dosáhneme vypaření části kapaliny, to způsobí zvýšení počtu molekul syté páry a zvýšení jejího tlaku. Velikost tlaku syté páry není s lineární s teplotou. Ve skutečnosti je pro různé látky různá.



Graf 6) Závislost tlaku vodní páry na teplotě – křivka syté vodní páry [32]

kde: T_Anejmenší hodnota teploty [K]

p_Anejmenší hodnota tlaku [Pa]

T_kkritická teplota [K]

p_kkritický tlak [Pa]

Každý bod na této křivce odpovídá právě jednomu vniklému rovnovážnému stavu. Další informace, kterou je možné vyčíst z grafu, je teplota varu kapaliny při určitém tlaku.

Při znalosti chování syté páry a použití mikrovlnného záření pro vysoušení materiálu je nutnost nastavení výkonu přístroje tak, aby docházelo k dostatečnému odvodu vodních par. V opačném případě bude celý proces neúčinný a vysoce neekonomický. [1][32]

3.7. Shrnutí poznatků o mikrovlnném záření

Tato kapitola má za úkol přiblížit můj subjektivní pohled na problematiku mikrovlnného záření a jeho využití ve stavebnictví. Čerpám z načtené literatury a ze své zkušenosti s výzkumem v laboratorních podmínkách.

3.7.1. Výhody mikrovlnného záření

Za největší výhodu považuji možnost nedestruktivní sanace zdiva. Použití mikrovln na stávající konstrukci bez nutnosti zásahu do konstrukce je velké plus metody. Z hlediska účinnosti posuzuji metodu za jednu z těch účinnějších. Při správně určeném procesu vysoušení je dosaženo kvalitních výsledků. Zejména na poli sterilizace a vysoušení dřevěných prvků, kde mikrovlny fungují prozatím nejlépe a mají nejlepší výsledky.

3.7.2. Nevýhody mikrovlnného záření

Pro použití mikrovlnné technologie je potřeba elektrický proud. Vzhledem k jeho ceně, potřebného výkonu pro vysoušení a době, po kterou je potřeba vysoušení provádět, se jeví jako velká nevýhoda ekonomická náročnost procesu. Ekonomická náročnost vysoušecího procesu je předmětem této práce a bude probírána podrobněji dále.

Další nevýhodou jsou zdravotní účinky mikrovln na organismus. Osobně jsem pociťoval v době výzkumu vyšší únavu a někdy mírnou bolest v oblasti hlavy. Zvýšené teplo také nemusí být vždy příjemné.

Jako poslední uvádím kontakt s kovovými předměty. Při sanaci starších, či i historických staveb je obrovská pravděpodobnost výskytu skrytých, kovových předmětů ve zdivu, či krovu. Vyhledání pomocí detektoru kovu může být časově náročné a určitě jsou to další výdaje navíc.

4. VYMEZENÍ PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

4.1. Predikce experimentu

V současné době sklízí mikrovlnné vysoušení ovace na poli vysoušení a sterilizace dřevěných prvků. Tento experiment se zaměřuje na vysoušení, rozložení teplotního pole a ekonomickou náročnost při použití v pórovitém materiálu. Předpokládáme, že proces vysoušení bude uspokojující, co se týče rychlosti vysoušení a účinnosti.

Mikrovlny vysuší vlhkost v podobě vody na vodní páru a ta se bude z pórů tlačit ven, co nejkratší cestou. Bude sledován úbytek váhy, který dle mého názoru nemusí být striktně konstantní. Nastavení procesu bude provedeno tak, aby nevznikly trhliny mající vliv na únosnost a na statické požadavky materiálu. Je možný výskyt mikrotrhlinek v malém množství.

Dle nastudovaných materiálů předpokládáme šíření tepla od místa vystavenému záření, dále do materiálu a teploty budou závislé na vlhkosti v daném místě. Mikrovlny ohřívají vodu (vlhkost) a tím stoupá teplota. Teplota samotného materiálu bez vlhkosti nedosáhne vysokých teplot. S tím souvisí i vedení tepla, které za předpokladu nerovnoměrně rozložené vlhkosti v pórech materiálu, se bude šířit s vlhkostí, čili větší vlhkost bude mít větší teplotu a tam, kde se vyskytuje vlhkost, tam půjde teplo.

Predikce ekonomické náročnosti není moc pozitivní. Vzhledem k výkonům, které jsou potřeba pro vyzařování a cenám energie, které rostou, dovedu s předstihem předpovědět finanční náročnost spojenou s touto metodou.

4.2. Vymezení problematiky

V dnešní moderní době je kladen daleko větší důraz na rychlost, než tomu bylo dříve. Vlivem husté zástavby a výskytu mnoha starších objektů, je kladen větší důraz na jejich rekonstrukce a sanace. Tento fakt jde ruku v ruce s výzkumem a vývojem nových technologií pro tuto činnost. Mikrovlnné záření se jeví, jako ideální možná metoda pro tuto problematiku. Splňuje nároky na rychlost, účinnost a možnost sanovat přímo zasažené místo, bez nutnosti destruktivní metod.

Samotný proces mikrovlnného vysoušení není náročný, ovšem technologie generátoru mikrovln je už celkem složitější aparatura. Bývají vyrobené na zakázku a nejsou vyráběny komerčně. Na trhu se neobjevuje tolik výrobců a spíše jich ubývá. Přibývá ovšem firem, které se zaměřují na aplikaci mikrovlnného záření a tedy na samotnou sanaci touto metodou. Velmi často tyto firmy mají vidinu velkého zisku a nadhodnocují nesmyslně účinky vysoušecí metody. Obvykle je účinek poloviční, nebo žádný a způsobí více škody, než užitku.

Diplomová práce obsahuje shrnutí základních poznatků potřebných k pochopení problematiky vlhkosti. Přibližuje výrobu a vlastnosti pórobetonu a složitou problematiku v oblasti termodynamiky a měrné vazebné energie. Práce dále seznamuje s teorií mikrovlnného záření, s jeho využíváním v oblasti stavebnictví a s interakcí mikrovln s různými materiály. Teoreticky upozorňuje na správné použití metody, aby byla účinná a bezpečná.

V praktické experimentální části se zkoumalo, jak na vlhkost působí mikrovlny v pórovitém prostředí materiálu. V laboratorních podmínkách byly vzorky vystaveny mikrovlnnému záření a sledovalo se chování vzorku. Veškeré zjištěné poznatky byly zaznamenány a slouží k výstupu dat experimentu.

V diplomové práci jsou použity poznatky z dřívějších výzkumů ostatních, kteří se touto problematikou zabývali. Vše sloužilo pouze pro pochopení situace a odehrávajících se dějů. Doposud není striktně dán postup, či model použití, správného rozložení teplot a jiných dějů. Proto je práce postavena na experimentálním zjišťování účinků mikrovlnného záření na vlhkost v pórovitém materiálu. Účinky mikrovlnného ozařování ve stavebnictví nejsou dostatečně prozkoumány. Některé poznatky mohou být nové, některé se může povést vyvrátit. Porovnání výsledků je složité, neboť některé výsledky není možné ani s ničím porovnat.

4.3. Stanovení cílů práce

Problematika mikrovlnného vysoušení a sterilizace je velmi zajímavé téma, které mě oslovilo a chtěl jsem se dále vzdělávat v této oblasti. Pojem mikrovlny, či mikrovlnné záření se často objevuje kolem nás a díky vedení a radám doc. Ing. Karla Šuhajdy Ph.D jsem dostal potřebné informace pro vytvoření experimentu v této oblasti.

Cíl mé diplomové práce je experimentální analýza dané problematiky mikrovlnného vysoušení ve stavebnictví, konkrétně vystavení mikrovln s vlhkostí v pórovitém materiálu. Má práce sleduje konkrétně tři odvětví dané problematiky.

4.3.1. Rozložení teplotního pole vlivem vlhkosti v pórovitém materiálu

V této oblasti je sledováno postupné rozpínání a šíření teplotního pole v materiálu. Sleduje se působení mikrovln na vlhkost a tím i spojené zvýšení teploty. Celý postup je zaznamenáván a zpracováván pomocí optovláknového teploměru a termokamery. Snímky termokamery jsou zpracovány v programu FLIR QuickReport.

4.3.2. Účinnost zařízení

Účinnost procesu je určena na základě proběhlého experimentu. Sledován je hlavně potřebný čas pro zbavení se určité vlhkosti. Pro možné použití v praxi je důležité znát teoreticky co nejpřesnější potřebnou dobu pro úspěšné odstranění vlhkosti z daného prvku. Tento experiment je spjat pouze pro potřeby vysoušení pórovitého materiálu, nemůže být uplatněn na jiný materiál, neboť jiný materiál má jiné vlastnosti a jinak v něm působí vlhkost. Pro zdokonalení mikrovlnného vysoušení je potřeba provést podobné experimenty s různými materiály.

Pro zpřesnění poznatků je třeba doplnit spolupráci s výrobcí jednotlivých materiálů. Spolupráce s výrobcí a možnost zařadit informace o účinnosti mikrovlnného zařízení na daný materiál by mohla dopomoci k lepšímu využití mikrovln pro sušení.

4.3.3. Finanční náročnost vysoušení

S časovou náročností je spojena i spotřeba energie. Znalostí potřebného času pro vysoušení určité vlhkosti materiálu, znalostí výkonu generátoru mikrovln se dá zjistit, jak bude celý proces finančně náročný. Pro investora je cena procesu ve většině případech rozhodující. Znalost tedy i této informace může být prospěšná pro rozhodnutí využít mikrovlnné zařízení jako volbu pro odstranění vlhkosti z materiálu. Tento cíl práce je závislý na ceně energií, které se ovšem mění. Pro zpracování budou použity ceny dodavatelů pro rok 2020. Vzhledem k výkonům generátoru mikrovln a době použití není predikce finanční náročnosti optimistická.

5. EXPERIMENT

Experiment probíhal v laboratorních podmínkách v prostorách VUT v Brně na fakultě stavební. Veškeré zařízení bylo zapůjčeno od VUT a vzorky rovněž poskytlo VUT v Brně. Samotný experiment trval od 3.6.2019 do 5.9.2019. Průběh experimentu byl pečlivě zaznamenáván pro zpracování výstupních dat.

Pro potřebné cíle mé diplomové práce postačil tento jeden experiment. Data z tohoto experimentu byly zpracovány tak, aby jednotlivé cíle byly prověřeny a vysvětleny.

Jako poradci pro experiment sloužili zaměstnanci VUT, kteří jsou experti v dané problematice. Nasměrovali experiment správným krokem, či poradili a vysvětlili problematiku spojenou s mikrovlnným zářením a jeho interakcí s vlhkostí. Kromě fyzických osob byl experiment nastaven podle teoretických poznatků, které byly nastudovány pro pochopení problematiky a jejich základů. V teoretické části diplomové práce jsou uvedeny zjištěné základy a poznatky pro správné provedení experimentu.

5.1. Použité přístroje

Veškeré potřebné přístroje zapůjčilo VUT v Brně. Tímto bych chtěl poděkovat za možnost experiment provést se zapůjčeným vybavením. Je potřeba si uvědomit, že se jedná o poměrně drahé technologie a z vlastních zdrojů by nebylo možné experiment uskutečnit.

Mikrovlnné vysoušecí zařízení

Nejdůležitější zařízení pro celý výzkum. Toto zařízení bylo zapůjčeno od VUT v Brně. Nejdůležitější parametry vysoušecího zařízení jsou tyto:

- výkon 700 W,
- příkon 1100 W,
- frekvence mikrovln 2,45 GHz,
- elektrické napětí 220/380 V.



Obr.7) Generátor mikrovlnného záření

Na obrázku je vidět používaný přístroj pro generování mikrovlnných vln od firmy Romill. Firma Romill vyvíjí a vyrábí generátory o různých frekvencích. V tomto případě se jedná o základní řadu jejich generátoru.

Generátor je osazen jednoduchým, vzduchem chlazenými magnetrony, které mají fixní výkon. Fixní výkon znamená, že generátor nemá možnost regulace výkonu a proto po celou dobu disponuje stejným výkonem. Od výrobce je určeno, že magnetrony mají o řád nižší životnost, než samotný generátor. Proto je magnetron v servisním řádu uvažován, jako standardní náhradní díl a je možné ho kdykoliv v rámci servisu vyměnit.

Ovládání tohoto zařízení je velmi jednoduché, v podstatě stačí nasměrovat zařízení potřebným směrem a zapojit zástrčku do elektrické sítě. [33]

Optovláknový teploměr

Pro sledování teplot během ohřevu pomocí mikrovln je potřeba zařízení, které odolá mikrovlnnému záření. Pro toto použití je ideální optovláknový teploměr. Tímto zařízením disponuje fakulta stavební na VUT v Brně a bylo zapůjčeno pro potřeby výzkumu.

Jedná se o zařízení Optocon fototemp Compact. Sleduje teploty pomocí optických vláken. Je ty možné sondy umístit do míst, kde by jiné zařízení bylo zničeno vlivem působení mikrovlnného záření, či výskytu vysokých teplot. Hlavní parametry teploměru jsou následující:

- 4 – kanálový vstup,
- napájení 24VDC,
- rozsah měření od -200 °C do +200 °C,
- odchylka $\pm 0,2$ °C,
- odezva 250 ms.



Obr.8) Optovláknový teploměr

Jedná se o výrobek německé firmy WEIDMANN TECHNOLOGIES DEUTSCHLAND GMBH. Výrobce garantuje, že za celou dobu životnosti není potřeba recalibrace. Toho dosáhl za použití arzenidu gallia (GaAs).

Jednotka disponuje 1 až 4 kanály, každý má odezvu 250 ms. Tato rychlost zaručuje rychlé určení teploty s přesností $\pm 0,2$ °C. Samotná jednotka je menších rozměrů. Display osazený na jednotce ukazuje jednotlivé teploty kanálů bez nutnosti připojení k dalšímu zařízení.

Optické senzory jsou nevodivé a odolné proti působení vysokofrekvenčnímu a mikrovlnnému záření. Jsou odolné přímému výskytu vysokých teplot. Sondy jsou také navrženy tak, aby vydržely drsné a korozivní prostředí. Vnější plášť tepelných senzorů z optických vláken je vyroben z teflonu, na jeho špičce je připojen GaAscrystal. [34]

Termokamera

Termokamery výrobce FLIR mají uplatnění nejen ve stavebnictví, ale i v jiném průmyslu. Termokamera umožňuje měřit teploty až do +400 °C. Disponuje digitálním fotoaparátem, který pořizuje termovizní snímek, který se objevuje přímo na samotné termokameře. Pro zpřesnění funkcí je termokamera vybavená funkcí zaměřovače, další funkce je teplotní škála, která se zobrazuje okamžitě po zaměření kamery na sledované místo. Některé kamery vyšší třídy umožňují výměnu čočky, která umožňuje sledovat objekty na větší vzdálenost, či vyšší citlivost rozpoznávání teplot.

Kamera ukládá veškeré pořízené fotografie na SD kartu. Po připojení s PC je možné upravovat a získávat informace ze snímku. K tomu slouží software, který dodává výrobce, nebo volně šiřitelný software FLIR QuickReport, ve kterém byly informace zpracovány pro potřeby diplomové práce.

Hlavní parametry termokamery FLIR jsou následující:

- rozlišení senzorů 80 x 60 px,
- teplotní citlivost $< 0,15$ °C,
- teplotní rozsah od -20 °C do +250 °C,
- zorné pole $45^\circ \times 34^\circ$.

[35]



Obr.9) Termokamera FLIR

5.2. Popis experimentu

Základem celého experimentu byla příprava vzorků. Vzorky byly fakultou stavební dovezeny do dílen, které má fakulta k dispozici. Na vzorky byly použity pórobetonové tvárnice od výrobce YTONG a jejich rozměr byl 599x249x300 mm. Vzorky byly uloženy ve venkovním prostředí, uvažovalo se tedy, že přijaly určitou vlhkost. Byla to záměrná simulace toho, jakou vlhkost může pórobeton pojmout vlivem špatného uskladnění a atmosférických vlivů. Na experiment bylo připraveno osm vzorků, tedy čtyři celé tvárnice rozpůlené na rozměr cca 259x249x300 mm. Každý jednotlivý vzorek byl očíslován, přeměřen a zvážen. Pokračoval výpočet objemové hmotnosti, do této veličiny vstupovaly jako hlavní data naměřené hodnoty vzorků. Následně se vzorky umístily do připraveného prostoru pro průběh experimentu, aby došlo k ustálení vlhkosti ve vzorcích a nastolení co možná nejvíce podobných podmínek pro experiment. Po uplynutí 24 hodin začalo první ozařování vzorků.



Obr.10) Připravené vzorky

Ozařování probíhalo cyklicky. Pro experiment této diplomové práce byl zvolen cyklus 10 minut. Tento cyklus znamená, že po dobu 10 minut byl vzorek vystaven mikrovlnnému záření a jelikož experiment probíhal současně na dvojici vzorků, stejný časový úsek měl vzorek i na tzv. „vydýchání“. Praxe tedy byla taková, že po uplynutí 10 minut byl generátor mikrovlnného záření vypnut, vzorek ozařovaný narazen druhým vzorkem a generátor opět zapnut na 10 minut. Umístění vzorku před generátorem mikrovlnného záření je zobrazeno na Obr.11. Trychtýřová anténa generátoru mířila na střed vzorku a ten byl ve vzdálenosti cca 3 cm od antény. Důležité bylo, aby tato výměna proběhla v co nejkratší možnou dobu, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. V době vydýchávání vzorku byly zaznamenávány povrchové teploty vzorku a pořízené termosnímkami pomocí termokamery. Následně byl vzorek zvážen a odstaven do doby, než došlo k další výměně ozařovaného vzorku za vzorek vydýchávaný. Toto cyklování probíhalo tak dlouho, dokud se teplota měřená pomocí termokamery neustálila. Ustálená teplota byla známkou zbavení se vlhkosti, proto bylo měření ukončeno a vše se připravilo pro potřeby vysušování dalších vzorků. Jelikož se jednalo o malé procento vlhkosti, nebyl celý tento proces tolik časově náročný.

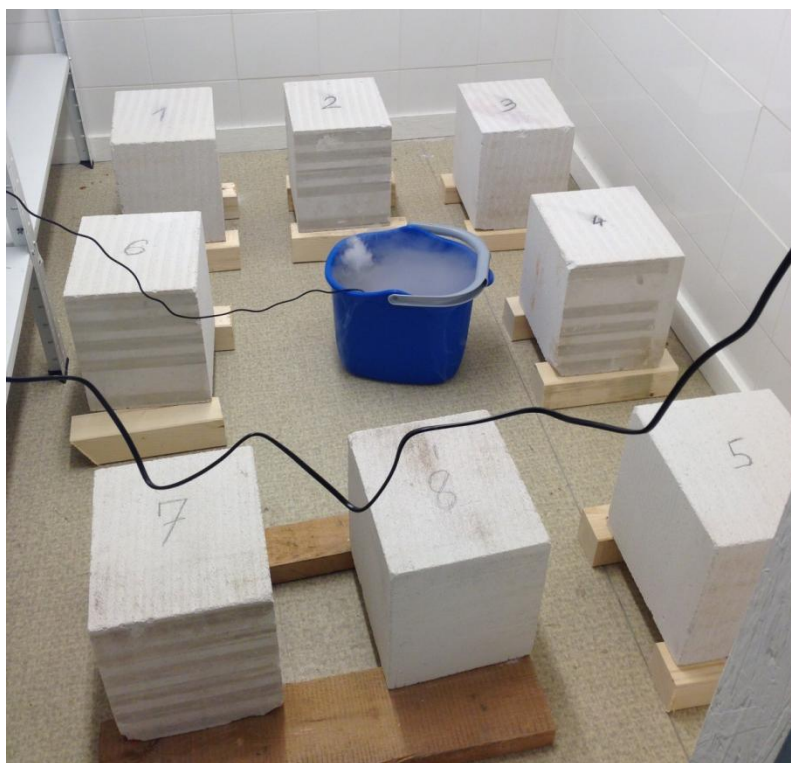


Obr.11) Umístění vzorku při ozařování

Po dokončení prvního měření byly vzorky umístěny do pece, pro získání hodnot zcela vysušeného vzorku. Pec byla nastavena na ustálenou teplotu horkého proudícího vzduchu 80 °C. Byla sledována hmotnost vzorku, po ustálení hmotnosti byla tato hodnota použita jako hodnota zcela vysušeného vzorku. V peci všechny vzorky strávili cca 48 hodin, než bylo dosaženo ustálení hmotnosti. Po převážení a porovnání veškerých dat bylo zjištěno, že vzorky v peci ztratili průměrně kolem 200 g hmotnosti. Do pece se velikostně vešly pouze dva vzorky současně. Proto tento proces probíhal současně s prvním měřením. Vždy po ukončení měření byly vzorky umístěny k peci, kde se následně všechny vzorky vysušily.

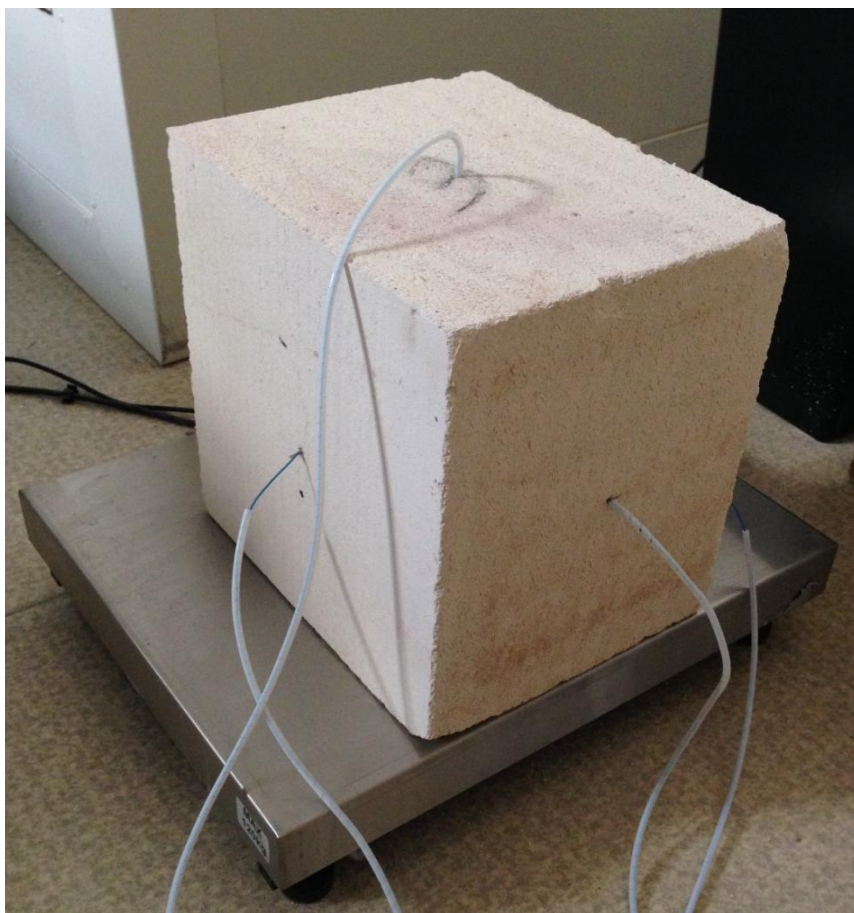
Po procesu vysušení následoval proces vlhčení. Tentokrát bylo cílem nasycení vzorků v průměru na 8 až 10 % vlhkosti. Tato vlhkost měla simulovat výskyt vzorku ve vlhkém prostředí, kontakt s atmosférickými vlivy, či vztlínání a přejímání vlhkosti z jiných částí objektu. Proto byl zvolen takový postup vlhčení, aby vzorky přejímaly vlhkost ze vzduchu. Vzorky se umístily do menší komory tak, aby měly kolem sebe dostatek prostoru a mohl kolem nich proudit vzduch. Uprostřed místnosti byla umístěna nádoba s vodou a v ní plovoucí generátor vlhkosti, který zařizoval celý proces vlhčení. Díky generátoru byla vlhkost vzduchu v místnosti stále v rozmezí 85 až 95 %. Každých

48 hodin byla dolita voda do nádoby a probíhalo převážení vzorku, pro určení míry nasycení vlhkostí ze vzduchu v komoře. Tento proces trval 14 dní, při kterých byl generátor zapnut v nepřetržitém provozu. Po tomto čase byla zjištěna průměrná vlhkost vzorků 9 %. Po ustálení, které trvalo 24 hodin, klesla průměrná hodnota vlhkosti vzorků na 8 % a s touto hodnotou bylo prováděno další měření.



Obr.12) Proces vlhčení pomocí generátoru vlhkosti

Při druhém měření byl k dispozici optovláknový teploměr a bylo nutné umístit optické senzory pro měření teploty. Umístění senzorů bylo vždy uprostřed strany vzorku. Jednalo se o stranu přímo ozařovanou, stranu protější, vrchní stranu a božní neporušenou stranu. Hloubka umístění senzoru 5 cm pod povrchem. Senzory byl osazen vždy jeden z dvojice vzorků, aby bylo možné sledovat průběh teplot i v době vydýchávání vzorků. Celý proces vysušování probíhal stejně, jako ten předchozí. Opět se jednalo o 10 minutové cykly ozařování a vydýchávání vzorku. V době vydýchávání byly navíc sledovány hodnoty naměřené optovláknovým teploměrem. Zaznamenány jsou teploty při ukončení ozařování a při ukončení vydýchávání vzorku. Ukončení měření proběhlo po ustálení teplot naměřených optovláknovým teploměrem a po navázení hodnot přibližujících se váze zcela vysušeného vzorku.



Obr.13) Umístění optických senzorů na vzorku č. 3

Po druhém měření následovalo opět vlhčení vzorků. Další simulovaná situace měla být přímá konfrontace vlhkosti se materiálem, tedy přímí kontakt s vodou vlivem chybějící, či poškozené hydroizolace. Pro tuto situaci bylo zvoleno potřebné procento nasycení vlhkostí 20 % a více. Zvolený postup vlhčení byl tedy takový, že vzorky budou vystaveny přímému kontaktu s vodou. Byla připravena vana, do které se umístily vzorky a následně byly zality vodou. Vzorky byly ponořeny z větší části ve vodě po dobu 48 hodin. Za tuto dobu byla naměřená průměrná hodnota vlhkosti 25 %. Vytažené vzorky se nechaly v místnosti znovu ustálit po dobu 24 hodin a všechny vzorky znovu převáženy. Po ustálení byla vypočítaná průměrná vlhkost 24 % a s touto hodnotou bylo dále pracováno. Na tomto stylu vlhčení je vidět, jak nebezpečný je přímí kontakt pórobetonu a vody. Ze vzduchu byla doba nasycení 14 dní a hodnota vlhkosti se vyšplhala pouze na 9 %. U namočení vzorků po 2 dnech dosahovala vlhkost 25 %.



Obr.14) Vlhčení vzorků přímým kontaktem s vodou

Po vlhčení následoval opět proces vysoušení, tentokrát poslední měření. Znovu byl použit stejný 10 minutový cyklus a vlastně stejný postup, co fungoval i v předešlém měření. Toto měření ovšem mělo jednu menší změnu, oproti předešlému. Vzhledem k míře nasycení vlhkosti bylo jasné, že za jeden den nebude možné měření jednoho vzorku dokončit. To bylo důvodem rozdělení doby potřebné pro vysoušení jednoho vzorku do dvou dnů. Aby nedošlo ke zkreslení, bylo třeba striktně dodržet cyklování první den a hlavně pauzu mezi jednotlivými dny měření udržovat stejně dlouho. Zvolil se postup, kdy první den proběhlo 34 cyklů a následně proběhla do druhého dne. Měření první den zabralo tedy cca 12 hodin, v případě začátku měření v 6 hodin ráno to znamenalo, že konec měřícího dne nastal v 18:00 a začátek vždy v 6:00. Pauza mezi jednotlivými měřícími dny se pohybovala rovněž kolem 12 hodin. Toto časové rozvržení bylo dodržováno po celou dobu měřícího cyklu, aby výsledné hodnoty byly co nejméně zkreslené mírou delší, či kratší pauzy. Pauzu vzorky trávili ve stejném prostředí, v jakém byly i vysušovány. Tím bylo zamezeno kontaktu jiného prostředí, než v jakém jsou vzorky po celou dobu experimentu.

Celý průběh experimentu byl řádně zaznamenáván a veškeré výsledky byly konzultovány s vedoucím práce. Jednalo se o časově zdlouhavý experiment, při kterém bylo vždy třeba dávat pozor na správný průběh experimentu. V letním období, kdy se venkovní teploty šplhaly k hranici 35 °C, byl experiment i fyzicky náročný. Při vysušování za pomoci mikrovlnného záření vzniká velké teplo. Toto teplo dokázalo vytopit laboratoř na teploty přibližně 28 °C, což bez možnosti ochlazení se nebylo příjemné. V době experimentu není možné opustit laboratoř na delší dobu, než je doba odpovídající cca 6 minutám. Je to z důvodu cyklování a co možná nejmenšího prodloužení a co možná nejpřesnějšího dodržení určeného trvání cyklu.

5.3. Výsledky experimentu

Pro vstupní data byla vytvořena přehledná tabulka, v níž jsou zaznamenány nejdůležitější hodnoty vzorku, vstupujících do jednotlivých měření. Pro experiment byly brány průměrné hodnoty, tedy vždy nejlepší a nehorší vzorek byl škrtnut a nebyl započítán do průměru. Pro tento experiment byla důležitá vstupní hodnota objemová hmotnost vzorku, proto nejvyšší a nejnižší objemová hmotnost byla vyškrtnuta a nebyla započítána do průměru.

První tabulka znázorňuje hodnoty vysušeného vzorku, ze kterého se určovalo procento nasycení pro další měření. Můžeme v tabulce vidět zaznamenané váhy jednotlivých vzorků, naměřené rozměry vzorků a vypočtené hodnoty objemové hmotnosti, z nichž je pak vypočtena průměrná objemová hmotnost suchého vzorku. Tyto informace jsou patrné i ve všech ostatních tabulkách s počátečními daty. I zde jsou znázorněny hmotnosti vzorků, jejich rozměry a následně spočtena objemová hmotnost a průměrná objemová hmotnost.

Tab. 5) Vstupní data vysušeného vzorku

Vzorek	Váha [kg]	Rozměr [m]	Objem [m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Č.1	8,612	0,30x0,247x0,295	0,0218595	393,9706
Č.2	8,796	0,30x0,247x0,29	0,021489	409,3257
Č.3	8,578	0,30x0,247x0,29	0,021489	399,1810
Č.4	8,858	0,30x0,248x0,29	0,021576	410,5488
Č.5	8,722	0,30x0,245x0,29	0,021315	409,1954
Č.6	8,828	0,30x0,245x0,295	0,021683	407,1392
Č.7	8,668	0,30x0,247x0,295	0,0218595	396,5324
Č.8	8,984	0,30x0,247x0,295	0,0218595	410,9884
Aritmetický průměr objemové hmotnosti [kg/m ³]				405,4729

Díky této tabulce a výsledné průměrné objemové hmotnosti bylo dosaženo základní hmotnosti pro určování dalších postupů pro celý experiment.

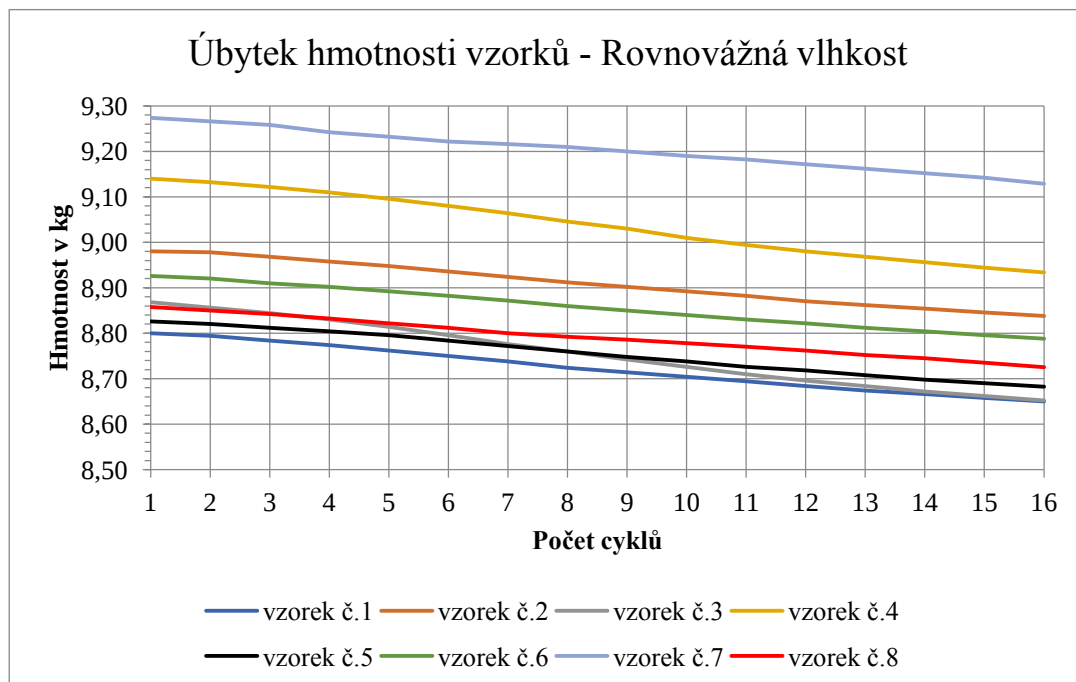
Následuje experiment vysoušení vzorků, které byly nasyceny na 3 % vlhkosti. Tabulka se vstupními daty vypadá takto:

Tab. 6) Vstupní data vzorků navlhčených na 3% vlhkosti

Vzorek	Váha [kg]	Rozměr [m]	Objem [m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Č.1	8,8	0,30x0,247x0,295	0,0218595	402,5710
Č.2	8,98	0,30x0,247x0,29	0,021489	417,8882
Č.3	8,87	0,30x0,247x0,29	0,021489	412,7693
Č.4	9,14	0,30x0,248x0,29	0,021576	423,6188
Č.5	8,83	0,30x0,245x0,29	0,021315	414,2623
Č.6	8,93	0,30x0,245x0,295	0,021683	411,8434
Č.7	8,86	0,30x0,247x0,295	0,0218595	405,3158
Č.8	9,28	0,30x0,247x0,295	0,0218595	424,5294
Aritmetický průměr objemové hmotnosti [kg/m ³]				418,0952

Při vysušování byl zaznamenáván úbytek váhy a pořizovány termosnímky. Úbytek hmotnosti byl po celou dobu vysušování lineární a u všech vzorků byl průběh dost podobný. Úbytek hmotnosti byl způsoben úbytkem vlhkosti, která uniká ze vzorku.

Tento průběh je patrný v následujícím grafu. Graf znázorňuje hmotnost vzorku a počet cyklů. V průběhu grafu je pak vidět úbytek hmotnosti vzorku, způsoben vypařením vlhkosti v jednotlivých cyklech experimentu.



Graf 7) Úbytek hmotnosti vzorků – rovnovážná vlhkost 3%

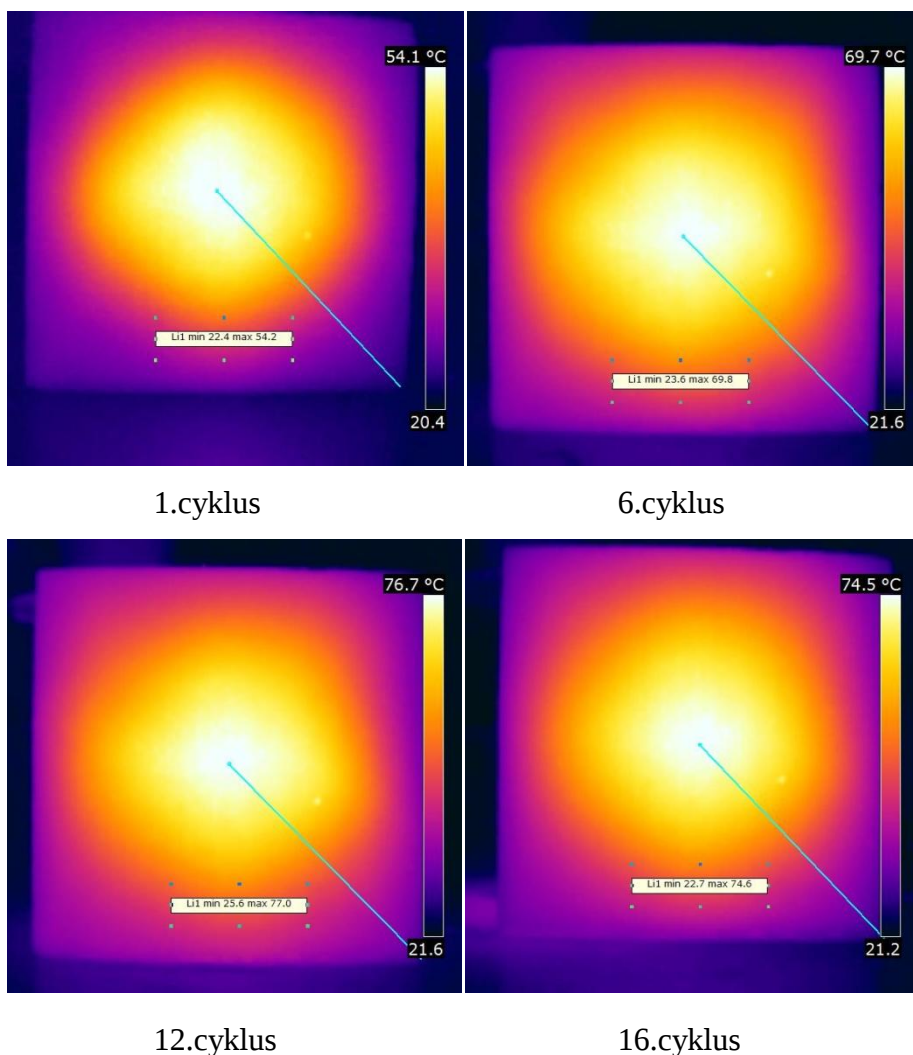
Graf je vytvořen z naměřených a zapsaných hodnot během vysušování. Z průběhu grafu je patrný lineární úbytek hmotnosti jednotlivých vzorků, během jednotlivých cyklů. Zaznamenaný průběh poukazuje na fakt, že úbytek vlhkosti u jednotlivých vzorků je podobný, ne-li stejný. Úbytek vlhkosti je tedy postupný.

V Tab. 7 je příklad zaznamenaných dat pro vzorek č.1 a č.2. Z těchto dat je vytvořen Graf 7 pro lepší představu o zjištěných datech. Jsou zde zaznamenány cykly a hmotnost vzorku, odpovídající pro daný cyklus. Tyto tabulky byly vytvořeny pro každý vzorek a každý stupeň nasycení vlhkostí.

Tab. 7) Zaznamenané data vysušování 3% vlhkosti vzorku

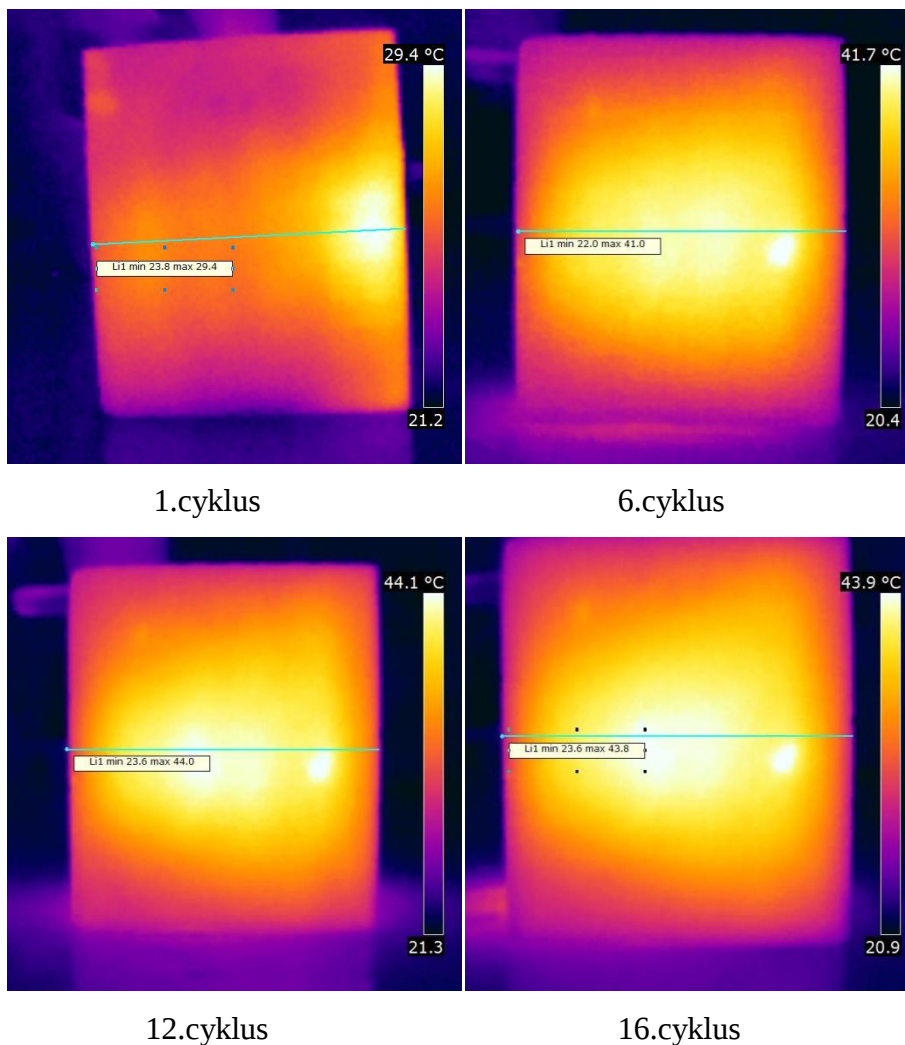
Vzorek	Původní váha [kg]	Cyklus [10min]	Váha [kg]
Č.1	8,80	1	8,800
		2	8,794
		3	8,784
		4	8,774
		5	8,762
		6	8,750
		7	8,738
		8	8,724
		9	8,714
		10	8,704
		11	8,694
		12	8,684
		13	8,674
		14	8,666
		15	8,658
		16	8,650
Č.2	8,98	1	8,980
		2	8,978
		3	8,968
		4	8,958
		5	8,948
		6	8,936
		7	8,924
		8	8,912
		9	8,902
		10	8,892
		11	8,882
		12	8,870
		13	8,862
		14	8,854
		15	8,846
		16	8,838

Pořízené termosnímky slouží pro znázornění šíření teploty a pomocí nich byly vytvořeny grafy pro přehled průběhu povrchových teplot. Byly pořizovány snímky ve směru přímo ozařované strany, vrchní strany a boční strany vzorku. Na snímcích je patrná barevná škála, odpovídající přiložené stupnici. Jednotlivým barvám náleží teplota. Ze snímků je patrné umístění a hodnota maximální povrchové teploty.



Obr.15) Průběh povrchových teplot vzorku č.1 při vlhkosti 3% - přímo

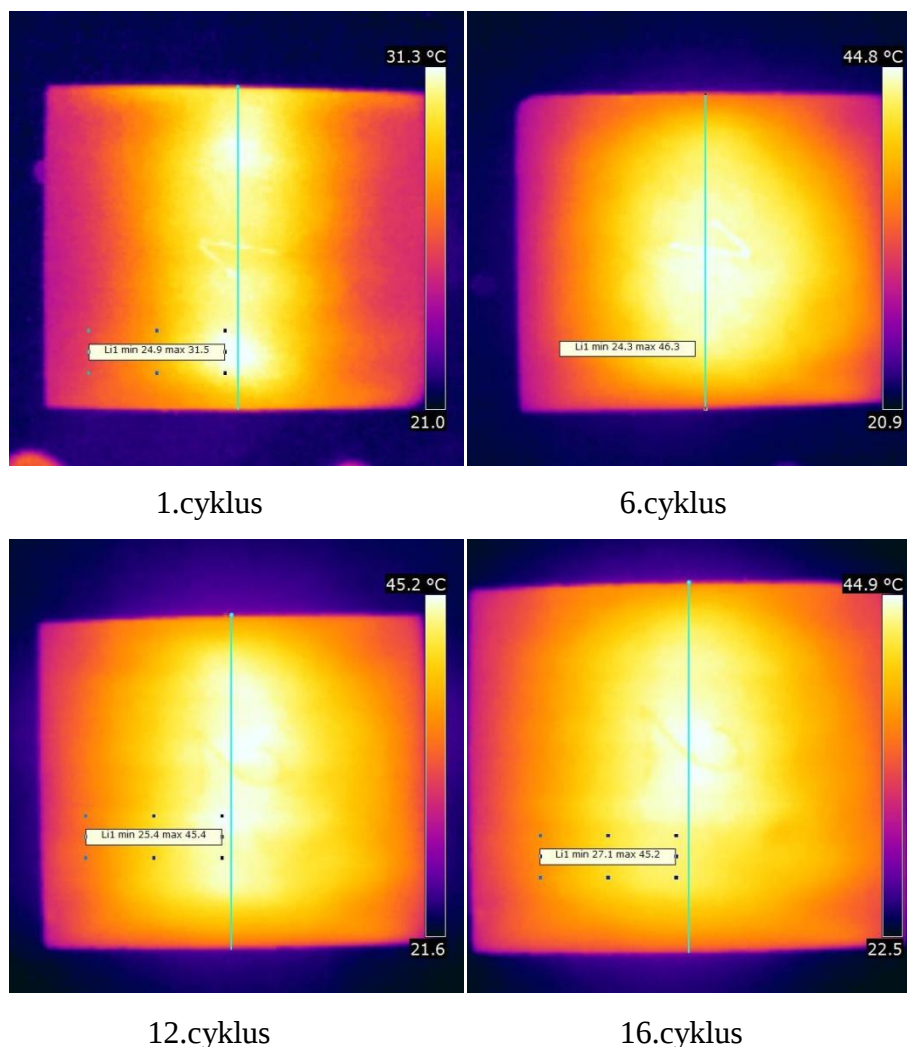
Z termosnímků je vidět, jak se teplota rozšiřuje od středu, kde je povrchová teplota nejvyšší. Tento fakt se projevuje i na vrchní a boční straně. Pokud se podíváme na boční stranu v prvotních cyklech, je nejvyšší teplota zaznamenána blíže k přímé straně ozařování. V dalších cyklech se opět nejvyšší teplota přesouvá do středu vzorku tak, jako tomu je na přímé ozařované straně.



Obr.16) Průběh povrchových teplot vzorku č.1 při vlhkosti 3% - bok

Rozdíl oproti přímé straně je i ve tvaru průběhu teplot. Přímá strana je do kruhového tvaru, boční strana do oválného. Tento jev je způsoben proudícími mikrovlny vzorkem a ohřevem vlhkosti uvnitř vzorku.

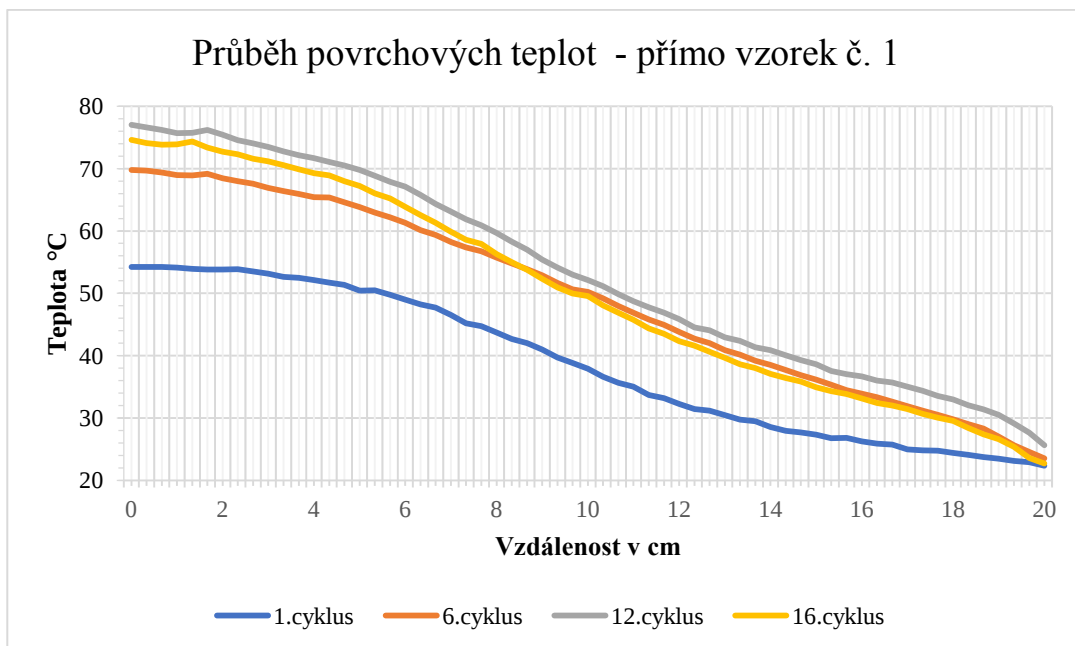
V následujícím obrázku je vidět průběh povrchových teplot na vrchu vzorku. Podobně, jako je tomu na boku vzorku, se chová i vrch vzorku. Tvar povrchové teploty je rovněž oválný a prochází středem vzorku. Nejvyšší teplota je opět v prostoru středu vzorku.



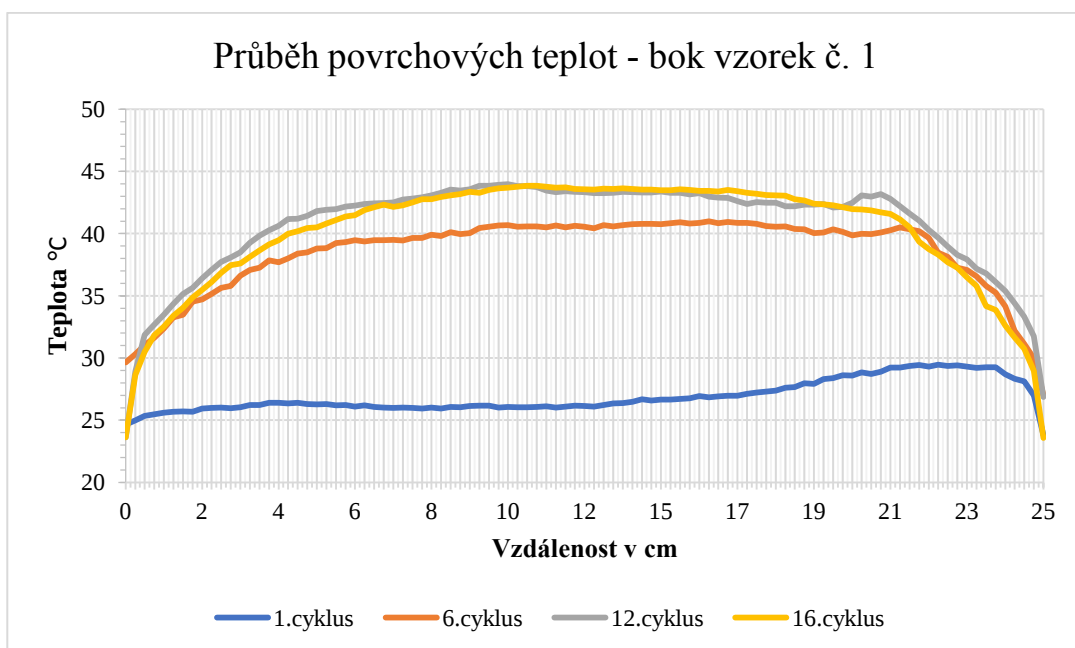
Obr.17) Průběh povrchových teplot vzorku č.1 při vlhkosti 3% - vrch

Průběh povrchových teplot z termosnímků je znázorněn na grafech. Z nich můžeme vyčíst, že průběh tvoří pomyslnou parabolu. Vrchol paraboly je ve středu vzorku, což je patrné z doložených termosnímků a grafy tuto skutečnost potvrzují.

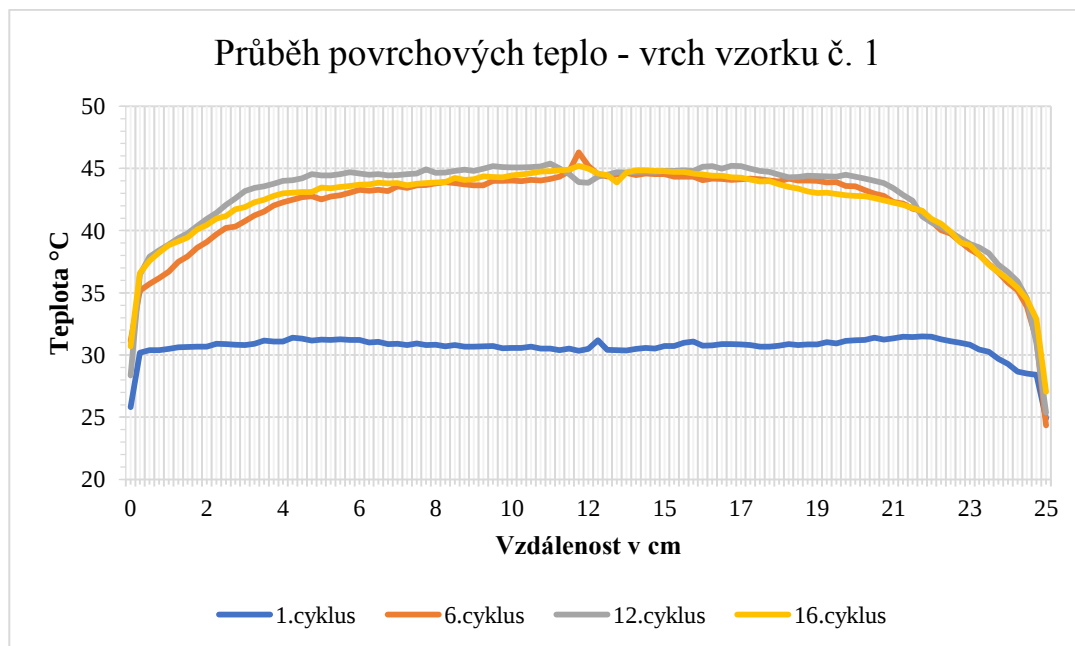
Grafy jsou tvořené z termosnímků pomocí programu FLIR Quick Report, pomocí proložené přímky, díky které program dokáže určit povrchovou teplotu v daném bodě. Grafy tvoří vzdálenost na straně vzorku a povrchová teplota. Je vidět vztah povrchové teploty v místě vzorku. tím je určen průběh povrchové teploty na jednotlivých stranách vzorků.



Graf 8) Průběh povrchových teplot – přímo vzorek č.1 při 3%



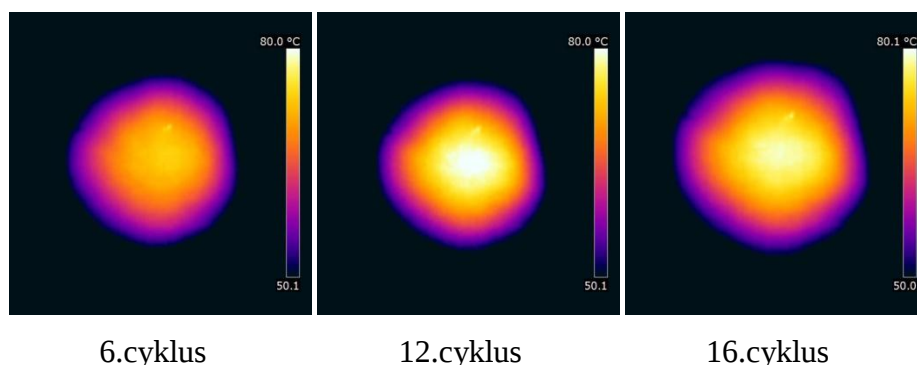
Graf 9) Průběh povrchových teplot – bok vzorek č.1 při 3%



Graf 10) Průběh povrchových teplot – vrch vzorek č.1 při 3%

Grafy a tabulky ostatních vzorků budou uvedeny v přílohách diplomové práce. Porovnání jednotlivých grafů měření neukázalo výraznější odlišnosti mezi jednotlivými vzorky.

Dalším sledovaným jevem bylo rozšiřování teploty na jednotlivých stranách vzorku. Sledovalo se zvýšení a rozšíření teploty, které bylo stanoveno pro jednotlivé měření. Určila se minimální sledovaná teplota a srovnala se škála, pro jednotlivé snímky, aby byl snáze rozpoznatelný rozdíl. Ukázalo se, že pro 3% vlhkost není nárůst tolik patrný a zvyšují se teploty uprostřed vzorku.



Obr.18) Nárůst povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 3% - přímo

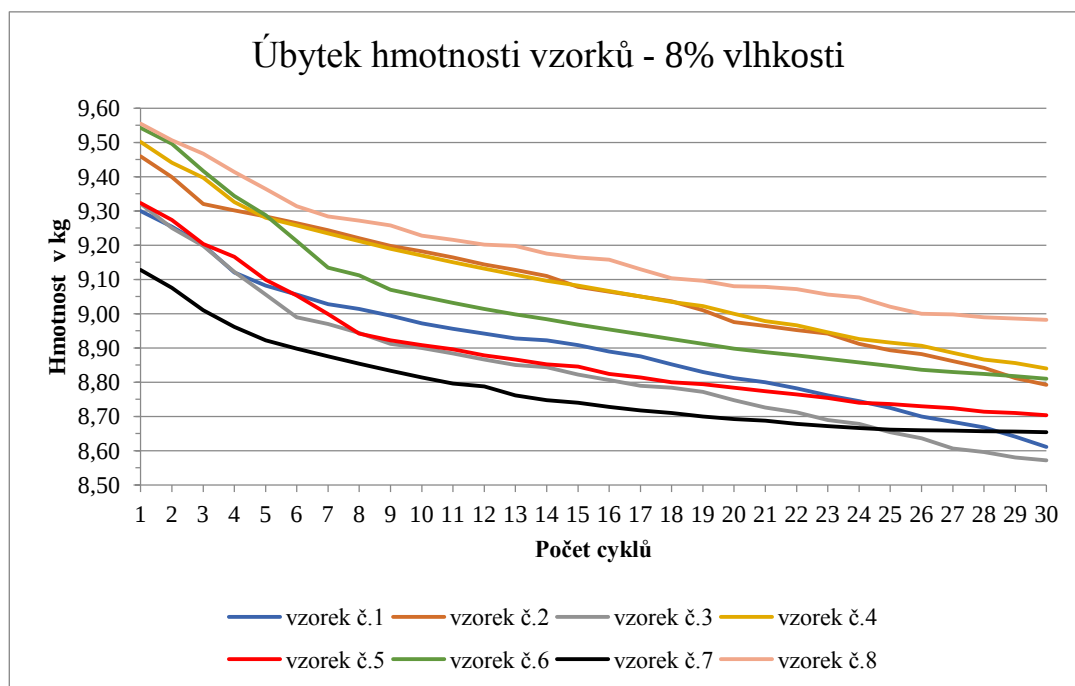
U 3% vlhkosti vzorků nedošlo na ostatních stranách k výraznějšímu nárůstu teplot, a proto se tedy zabývám pouze touto stranou přímo k záření. Z termosnímků je vidět, že 6. a 12. cyklus je velikostně stejný, zvýší se pouze teplota ve středu vzorku. U 16. cyklus je patrný i nárůst poloměru, kde se vykytuje povrchová teplota 50 °C.

Pro vlhkost vzorku stanovenou na hodnotu 8% byla vytvořena rovněž tabulka se vstupními daty. Opět se škrtil vzorek s nejvyšší a nejnižší objemovou hmotností a byla zjištěna průměrná objemová hmotnost a z té vychází stupeň nasycení vzorků vlhkostí. U předešlé vlhkosti byly seškrtnuty vzorky číslo 1 a 8. Pro 8% vlhkost nastala změna a místo vzorku číslo 1 se škrtil vzorek číslo 2. Vzorek číslo 8 byl škrtnut i v tomto případě navlhčení.

Tab. 8) Vstupní data vzorků navlhčených na 8% vlhkosti

Vzorek	Váha [kg]	Rozměr [m]	Objem [m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Č.1	9,356	0,30x0,247x0,295	0,0218595	428,0061
Č.2	9,514	0,30x0,247x0,29	0,021489	442,7381
Č.3	9,386	0,30x0,247x0,29	0,021489	436,7816
Č.4	9,552	0,30x0,248x0,29	0,021576	442,7141
Č.5	9,372	0,30x0,245x0,29	0,021315	439,6904
Č.6	9,594	0,30x0,245x0,295	0,021683	442,4664
Č.7	9,186	0,30x0,247x0,295	0,0218595	420,2292
Č.8	9,608	0,30x0,247x0,295	0,0218595	439,5343
Aritmetický průměr objemové hmotnosti [kg/m ³]				436,3610

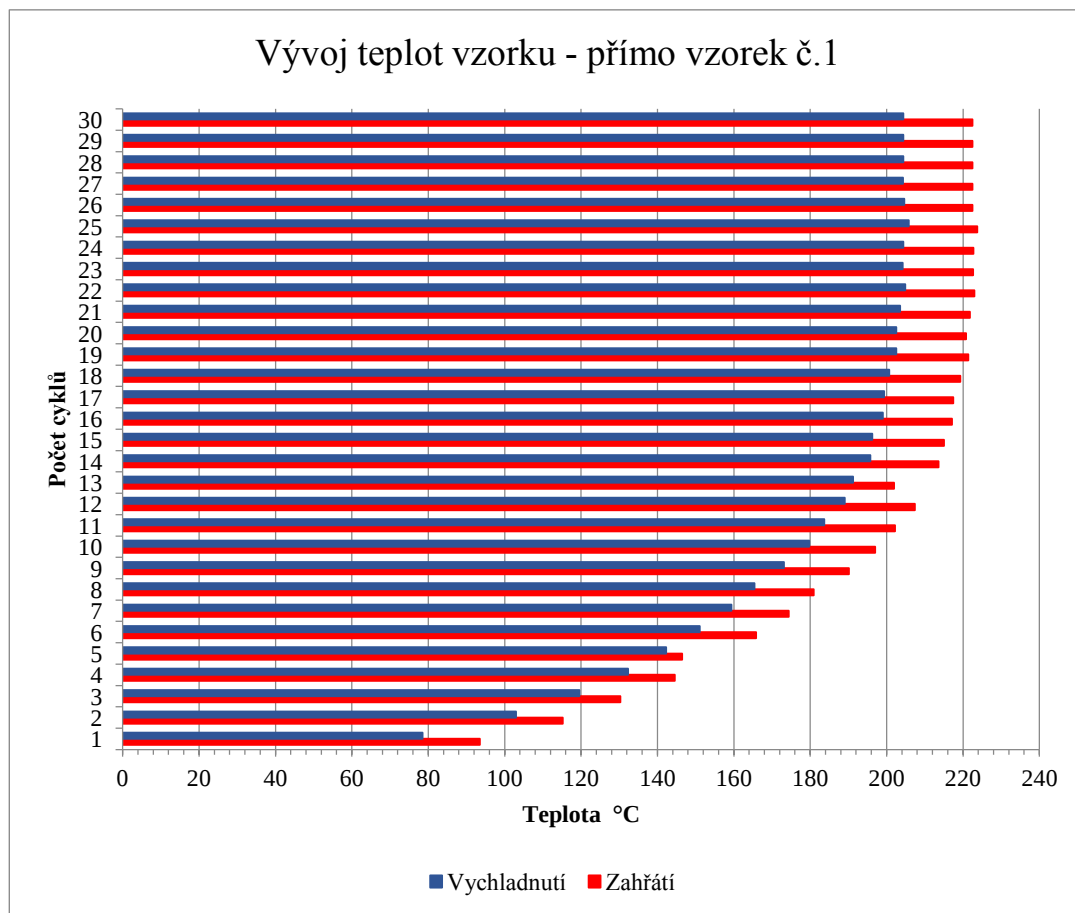
Průběh úbytku hmotnosti při vlhkosti rovné 8% je srovnatelný s poklesem 3% vlhkosti vzorků. Z Grafu 7 a Grafu 11 můžeme tedy vyčíst, že úbytek hmotnosti v cyklu se pohybuje v rozmezí 5 až 70 g za cyklus. Nepozorujeme v cyklech žádnou stagnaci, čili vždy po cyklu je zaručen úbytek hmotnosti (odpaření vlhkosti), který se pro zvolený cyklus, který je 10 minut ozařování a 10 minut vydýchávání, v dříve zmíněném rozmezí.



Graf 11) Úbytek hmotnosti vzorků – vlhkost 8%

Graf opět vychází z naměřených a zapsaných hodnot, které byly zjištěny během experimentu. Kromě úbytku hmotnosti a termosnímků byly sledovány i teploty pomocí optovláknového teploměru. Teploměr má čtyři pásma, bylo tedy možno sledovat čtyři senzory najednou. Sledovaly se tedy teploty na přímé straně, boční straně, vrchní straně a zadní straně, která je naproti přímé straně. Tak, jako pro úbytek vlhkosti, tak i pro teploty byly utvořené grafy pro lepší představu a přehlednost naměřených hodnot. Z grafů je možné vyčíst, jakým způsobem narůstala teplota a jelikož byla sledovaná i teplota po vychladnutí, lze pozorovat, jak celý proces cyklování probíhá. Upřesňuje nám průběh teplotního pole, který doposud byl známý pouze z povrchových teplot.

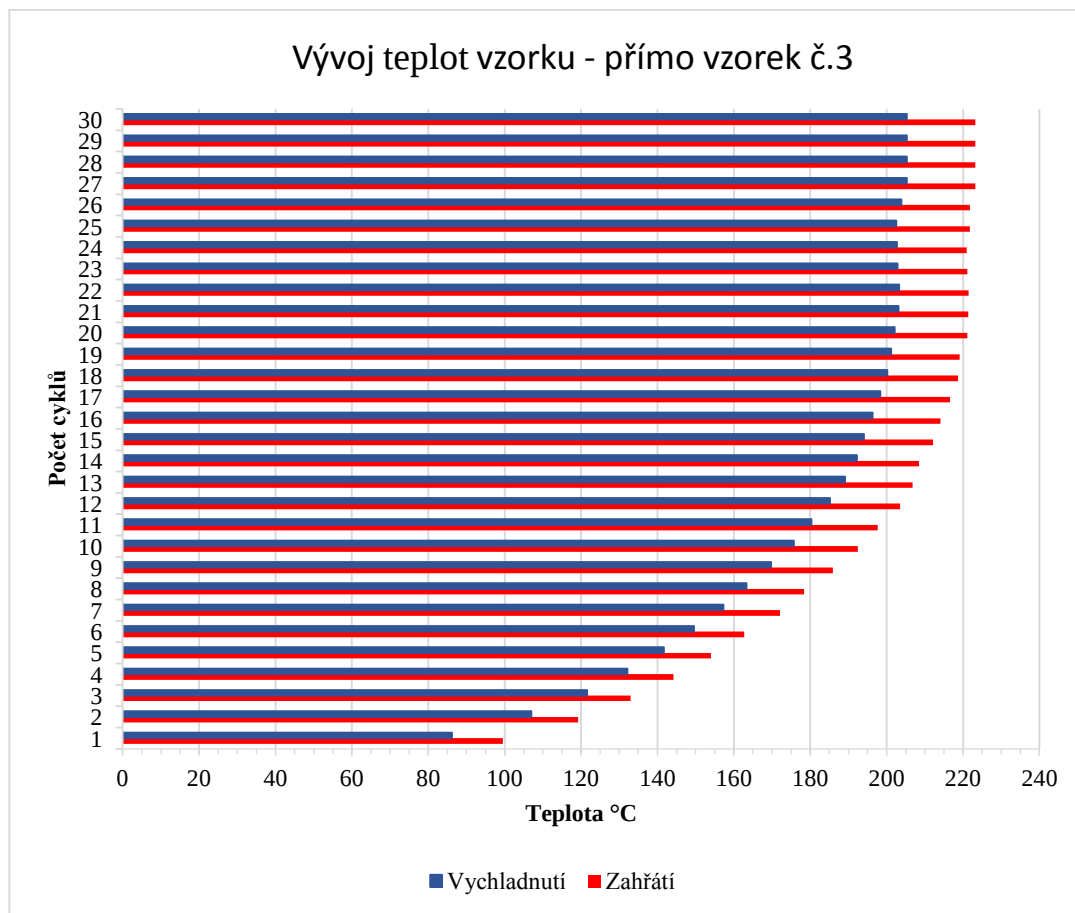
Porovnání vzniklých grafů je jednoduché, opět je vidět nárůst teplot v jednotlivých cyklech. Vnitřní teplota byla měřena na polovině vzorků, pro srovnání tedy bude brán vzorek s číslem 1 a vzorek s číslem 3. Zbylé grafy budou uvedeny v přílohách diplomové práce.



Graf 12) Vývoj teplot vzorku č.1 – přímo, vlhkost 8%

Zde je uveden graf vzorku číslo 1, který udává teploty na přímé ozařované straně. Znázorňuje vnitřní teploty v době zahřátí a v době vychladnutí, které se vztahují k jednotlivým cyklům. Na první pohled je vidět exponenciální nárůst teplot v době zahřívání i v průběhu vychladnutí. Důležitý poznatek je ten, že vyšším počtem cyklů, roste teplota a z Grafu 11 víme, že s vyšším počtem cyklů klesá hmotnost vzorku, tedy ubývá vlhkost. V závěru cyklování teplota ustává a to vlivem toho, že už chybí vlhkost, která by se mohla zahřívat mikrovlnným zářením a tím by teplota nadále rostla.

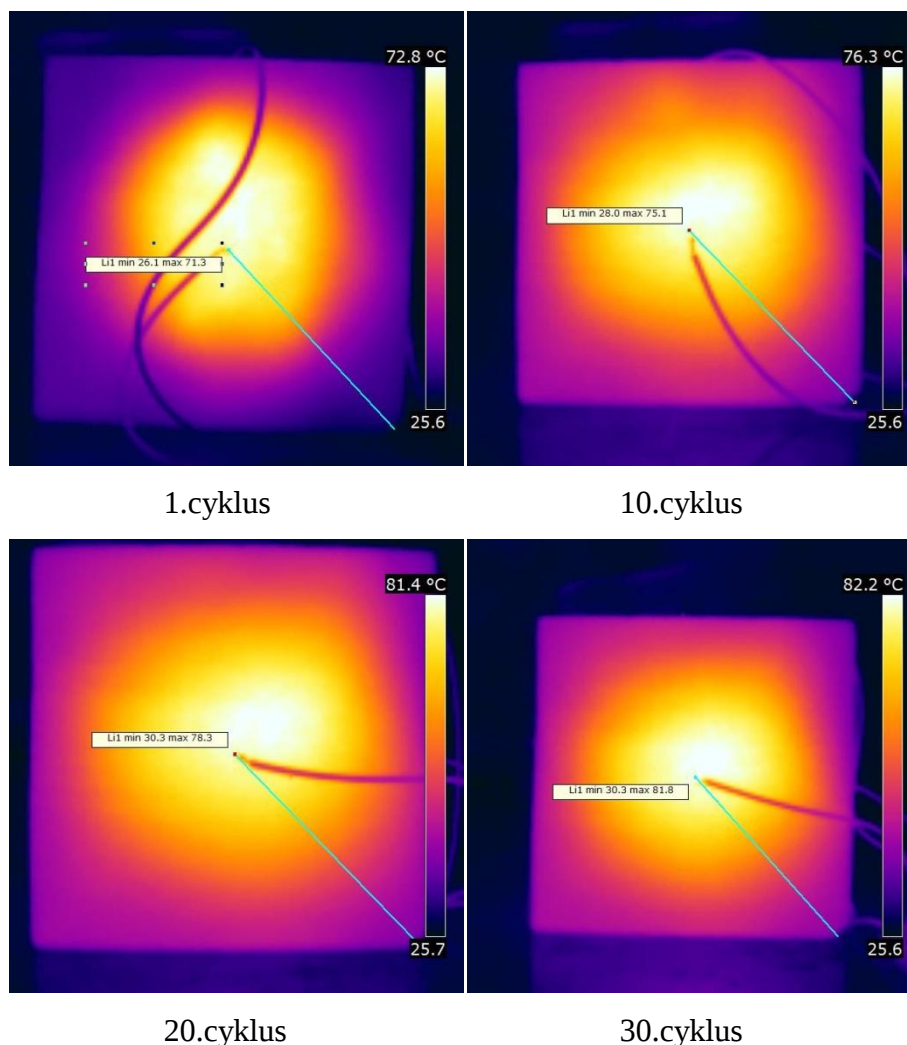
Pro porovnání je zde přiložen graf vzorku číslo 3. Na grafu si lze všimnout toho, že se grafy shodují. Opět je graf exponenciální a znovu je vidět ustálení teploty v konečném cyklování. Tento jev je stejný i pro vzorek číslo 5 a 7. Můžeme tedy říci, že tento jev je tedy společný pro všechny vzorky a nejedná se o náhodný jev.



Graf 12) Vývoj teplot vzorku č.3 – přímo, vlhkost 8%

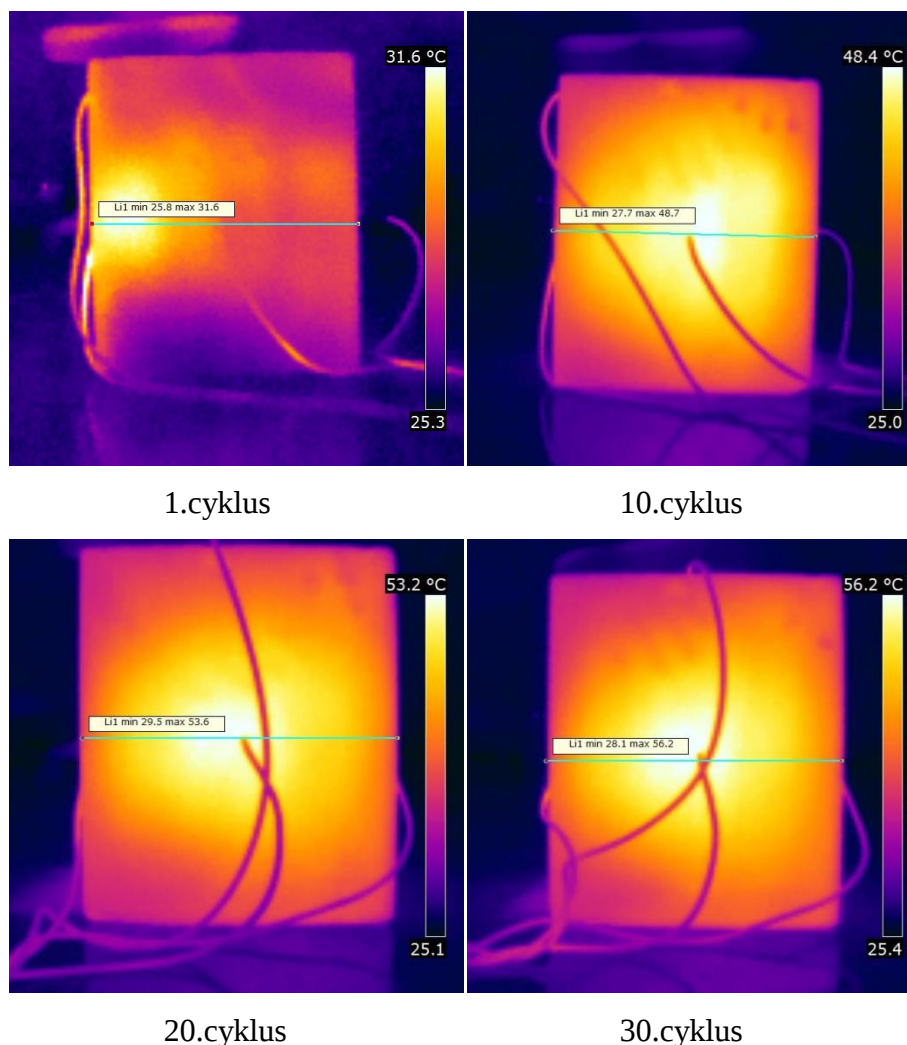
Ostatní strany vzorků se chovaly stejným způsobem, jako přímá strana vzorků. Nárůst teplot byl podobný, jako v případě přímé strany, opět v konečné fázi cyklování je vidět stejný jev, jaký se vyskytuje u přímé strany, tedy ustálení teploty. Rozdíl se projevuje při pohledu na boční a zadní stranu vzorku. V prvních třech až čtyřech cyklech zde teplota vychladnutí dosahuje minimálně stejných hodnot, jako teplota zahřátí. Ve většině případů dokonce tuto teplotu převyšuje. Pokud nebereme v úvahu rozdíl teplot na jednotlivých stranách vzorku, je toto jediný rozdíl v chování při jednotlivých cyklech.

Termosnímky znovu potvrdili výskyt nejvyšších teplot uprostřed vzorku, jako tomu bylo v případě prvního vysušování 3% vlhkosti. V případě přímé strany ozařování je opět viditelný kruhový tvar výskytu nejvyšších teplot s postupným ochlazováním směrem od středu vzorku. Díky vyššímu procentu vlhkosti byly naměřeny i vyšší teploty, než v případě vysušování 3% vlhkosti.



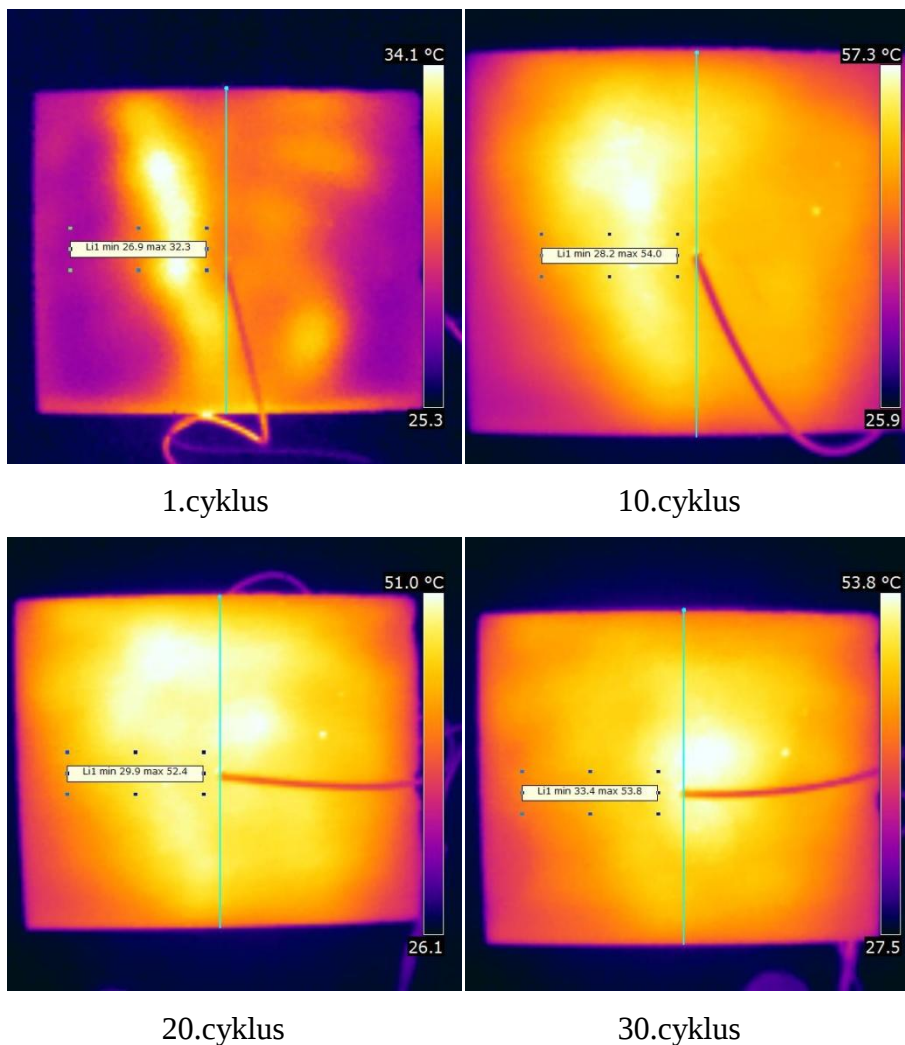
Obr.19) Průběh povrchových teplot vzorku č.1 při vlhkosti 8% - přímo

Boční strana vzorku vykazuje v počátku cyklování nejvyšší teplotu blíže ke straně, která je přímo ozařovaná. V pozdějších cyklech se opět maximální teploty přemístí do středu strany vzorku. I zde jsou teploty vyšší, než v případě vysušování 3% vlhkosti. Tvar výskytu maximálních teplot je oválného tvaru, tedy opět stejné chování, jako v dřívějším případě. Podobnosti mezi jednotlivými měřeními jsou vidět, navzdory vyššímu počtu cyklování v případě 8% vlhkosti vzorků. Na boční straně byla naměřena v počátku vysušování vyšší teplota v době vychlazování, než při zahřátí.



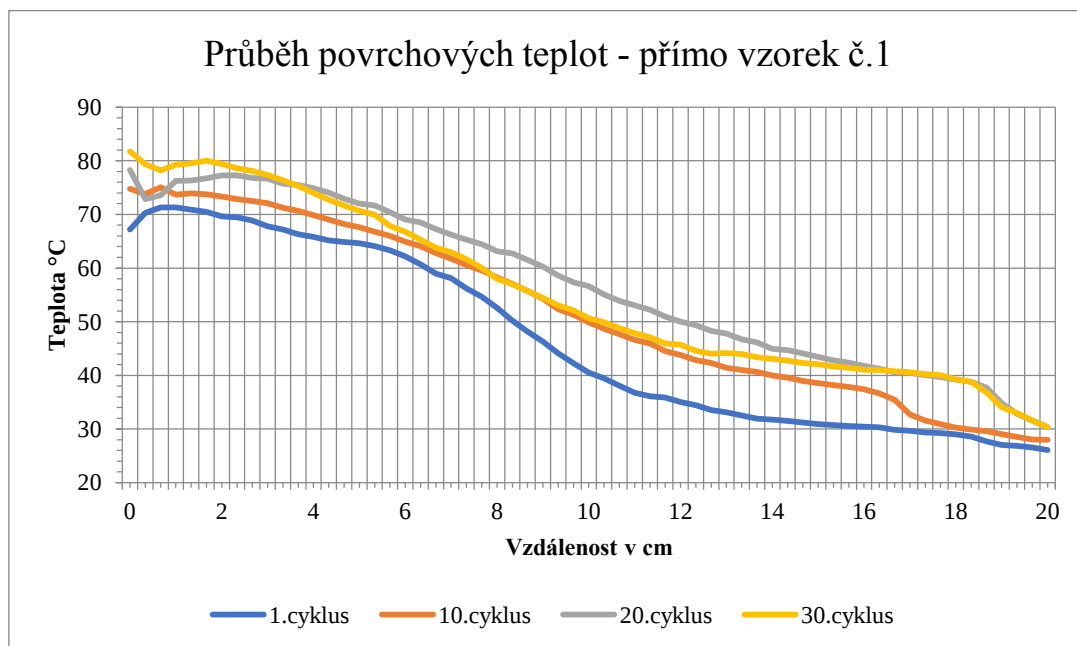
Obr.20) Průběh povrchových teplot vzorku č.1 při vlhkosti 8% - bok

Vrchní strana vzorku se chová podobně, jako ta boční. I zde byly naměřeny vyšší teploty, než v případě 3% vlhkosti. Rozdílně se vyznačují maximální teploty. Nejsou už soustředěné na jedno místo vzorku. V prvních cyklech jsou rozmístěny nepravidelně po vrchní straně vzorku. Tento jev se projevuje u každého vzorku. Ani jejich tvar se nevyznačuje určitou pravidelností, jako tomu bylo v předchozím případě, či na ostatních stranách vzorku.

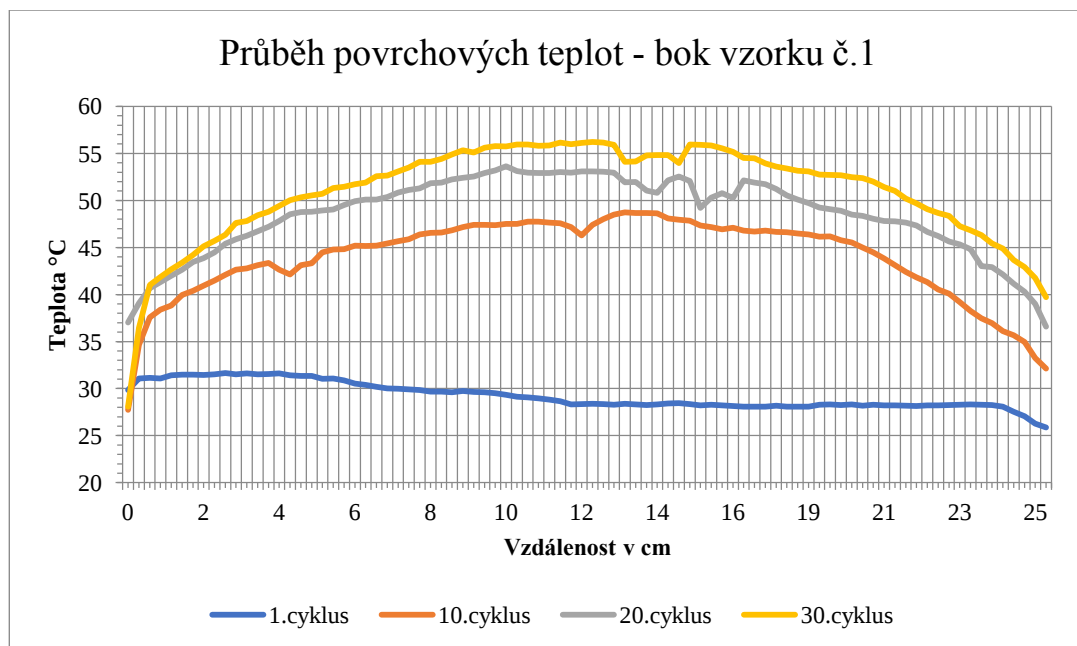


Obr.21) Průběh povrchových teplot vzorku č.1 při vlhkosti 8% - vrch

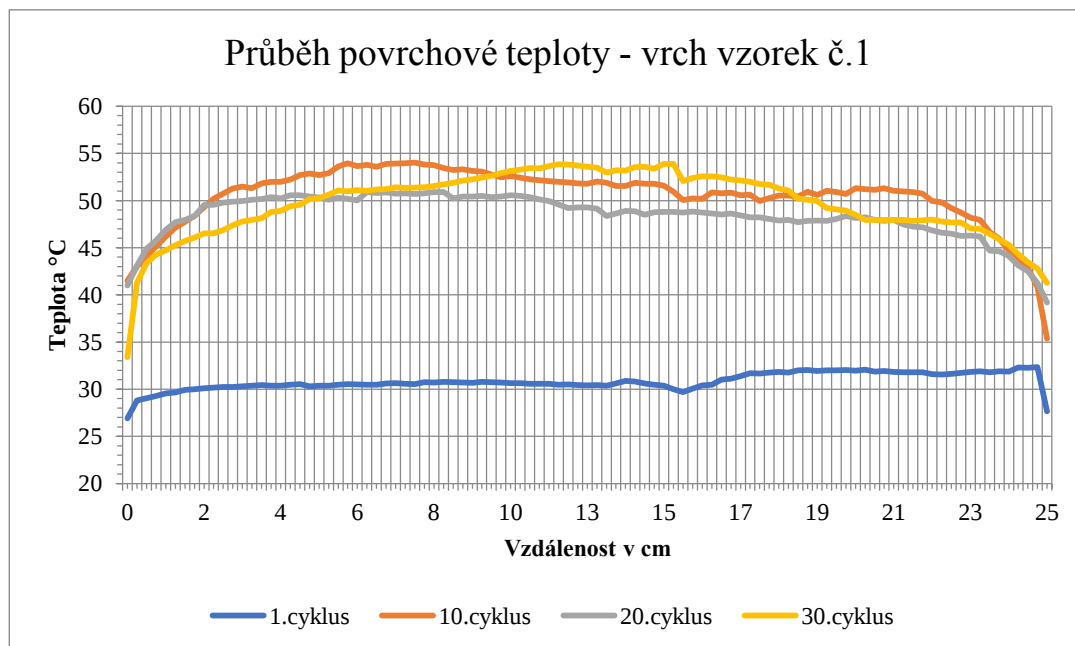
Vytvořené grafy opět potvrdily výskyt maximálních teplot v okolí středu jednotlivých stran vzorků. Průběh teplot je parabolický a od středu se teploty postupně snižují. Teplotní pole se tedy shoduje v obou případech vysušování. Při porovnání grafů povrchových teplot vzorků při 8% vlhkosti s grafy 3% vlhkosti je vidět podobnost průběhu grafů. Grafy byly opět vytvořeny pomocí programu FLIR Quick Report pomocí přímky viditelné na termosnímčích. Přímka je vždy vedena středem strany vzorku.



Graf 13) Průběh povrchových teplot – přímo vzorek č.1 při 8%

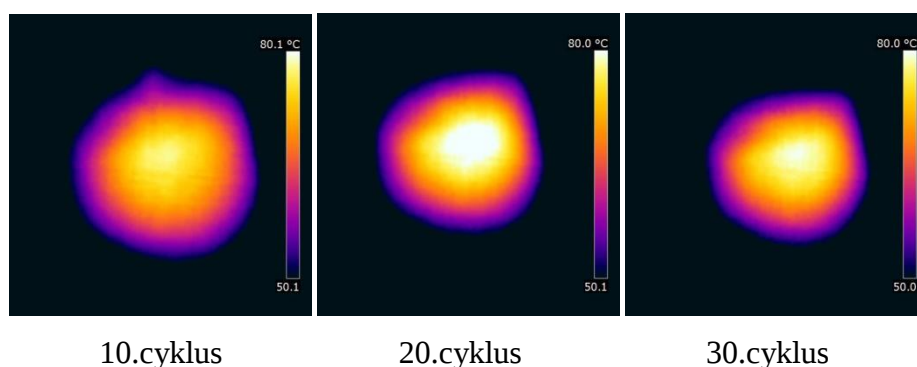


Graf 14) Průběh povrchových teplot – bok vzorek č.1 při 8%



Graf 15) Průběh povrchových teplot – vrch vzorek č.1 při 8%

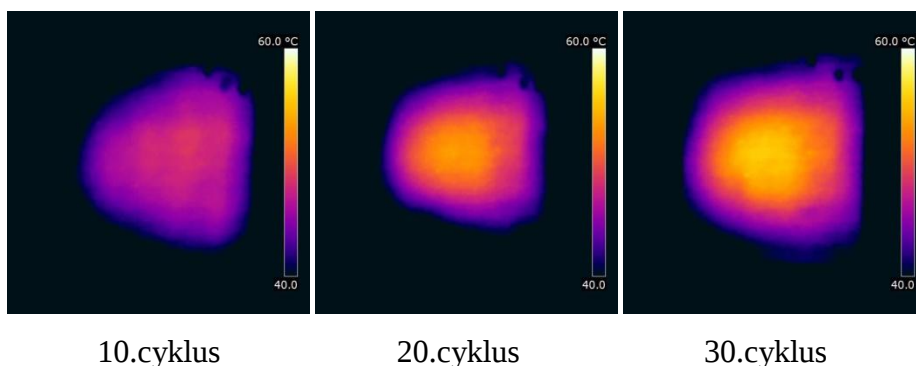
Pro sledování nárůstu oblasti maximální teploty bylo zpracováno, pro stranu přímo ozařovanou, rozmezí teplot od 50°C do 80°C.



Obr.22) Nárůst povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 8% - přímo

Opět se poloměr oblasti tolik nemění, spíše zůstává konstantní, více se mění střed vzorku, kde vzrůstá maximální naměřená teplota a postupně se rozšiřuje oblast s maximální teplotou. Na snímcích lze vidět konečnou fázi cyklování, kde lze vyčíst vychladnutí vzorku a úbytek plochy oblasti s maximální povrchovou teplotou. Jev způsobený ustálením teploty a snížením vlhkosti samotného vzorku je tedy i možné sledovat na povrchu vzorku. Snížení vlhkosti je patrné z úbytku hmotnosti vzorku, v posledním cyklu vzorky dosahovali hmotnosti vysušených vzorků.

Na boční straně vzorku je znázorněna oblast v rozmezí 40°C až 60°C. Oblast v průběhu cyklů mění svojí plochu minimálně a opět se zvyšuje maximální teplota, která se vyskytuje uprostřed strany vzorku.



Obr.23) Nárůst povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 8% - bok

Nárůst teplot na vrchní straně nebyl takový, aby byl vidět rozdíl v jednotlivých cyklech. Rozdíl oproti 3% vlhkosti je tedy ten, že při 8% vlhkosti bylo možné pozorovat změnu i na boční straně vzorku, která při 3% vlhkosti nevykazovala viditelné a porovnatelné změny. Ostatně tento jev je patrný i z grafu pro vrchní stranu vzorku. Jednotlivé průběhy cyklů jsou umístěny blízko sebe a teploty jsou tedy velmi podobné. V porovnání s prvním případem je nárůst povrchových teplot podobný.

Poslední třetí vysušování bylo nejvíce náročné na objem dat. Jelikož vzorky byly nasyceny na 24% vlhkosti, bylo zapotřebí mnohem více cyklů pro vysušování, než v předešlých případech vysušování. Více cyklů znamená více naměřených hodnot a více času potřebného k provedení vysoušení. Čas vložil do třetího experimentu nový problém v podobě nucené pauzy. Nebylo možné provést celé vysušování vzorku v jednom dni, a tak byl zvolen postup, kdy se striktně držel počet cyklů prvního dne vysušování vzorku a byla dodržena stejná doba pauzy, mezi jednotlivými dny vysušování, pro co nejmenší zkreslení výsledků experimentu.

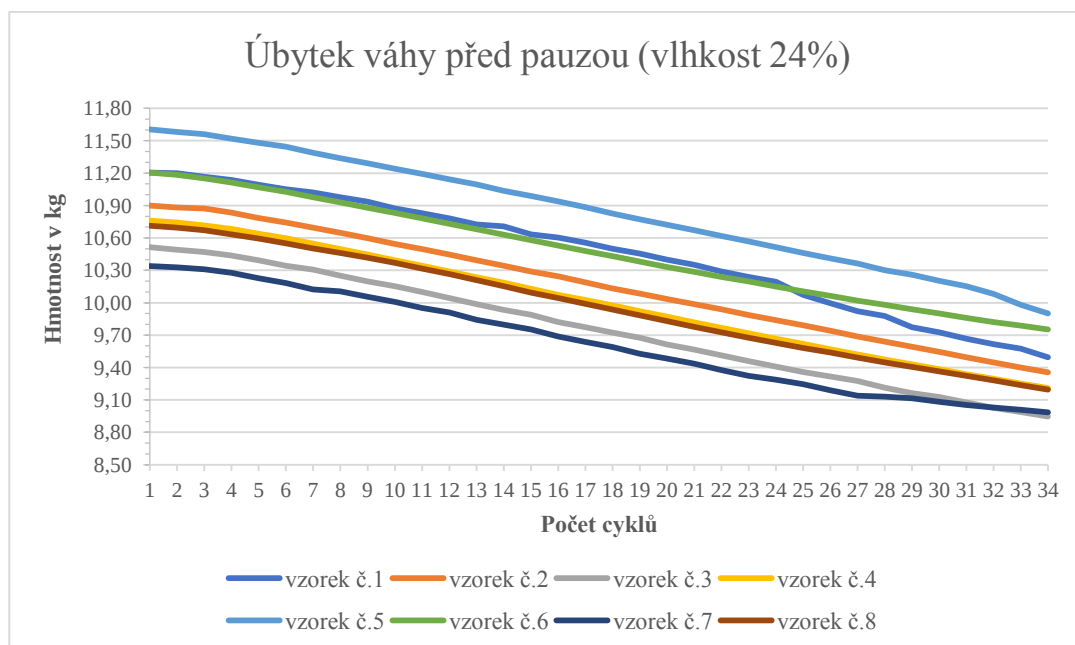
Třetí experiment má vytvořenou vlastní tabulku se vstupními daty. Znovu je hlavním sledovaným atributem objemová hmotnost vzorku, ze které se určuje procento nasycení vlhkostí. Tabulka udává vstupní data pro jednotlivé vzorky.

Tab. 9) Vstupní data vzorků navlhčených na 24% vlhkosti

Vzorek	Váha [kg]	Rozměr [m]	Objem [m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Č.1	11,232	0,30x0,247x0,295	0,0218595	513,8269
Č.2	10,912	0,30x0,247x0,29	0,021489	507,7947
Č.3	10,523	0,30x0,247x0,29	0,021489	489,6924
Č.4	10,768	0,30x0,248x0,29	0,021576	499,0730
Č.5	11,610	0,30x0,245x0,29	0,021315	544,6868
Č.6	11,212	0,30x0,245x0,295	0,021683	517,0871
Č.7	10,350	0,30x0,247x0,295	0,0218595	473,4784
Č.8	10,720	0,30x0,247x0,295	0,0218595	490,4046
Aritmetický průměr objemové hmotnosti [kg/m ³]				502,9790

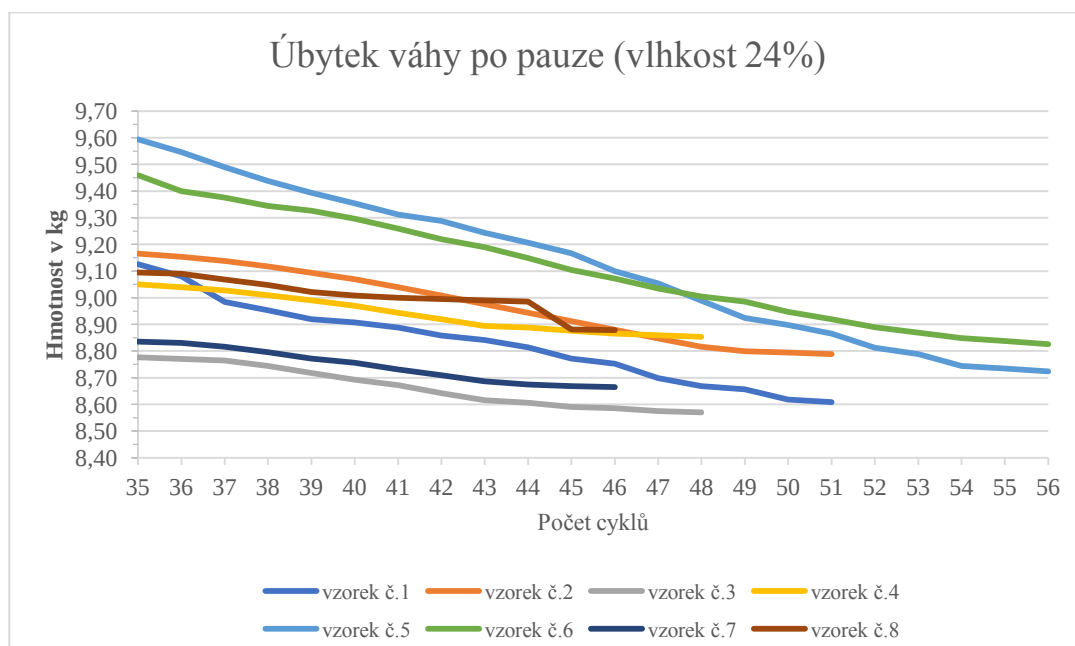
Ve třetím experimentu nastává změna ve škrtnání nejvyšší a nejnižší objemové hmotnosti. Pro tento případ byla vyškrtnuta hodnota vzorku číslo 2 a hodnota vzorku číslo 7. Tabulka znázorňuje hmotnost vzorků, rozměry vzorků a vypočtenou objemovou a průměrnou objemovou hmotnost, jako předešlé tabulky se vstupními daty.

Úbytek váhy je zaznamenáván dvakrát. Pro první vysoušecí den, kdy bylo uskutečněno vždy 34 cyklů a pro druhý den, kdy už nebyl dosažen stejný počet cyklů u všech vzorků. Znovu je viditelný úbytek hmotnosti vzorků, to znamená úbytek vlhkosti z jednotlivých vzorků za určitý cyklus. Grafy jsou utvořeny stejně pro proces před pauzou i pro proces po pauze. Mění se pouze počet cyklů. Grafy jsou srozumitelné a přehledné pro představu problematiky a procesů, dějících se během jednotlivých cyklů.



Graf 16) Úbytek hmotnosti vzorků – vlhkost 24%, před pauzou

Úbytek v prvotní části experimentu je stejný, jako tomu bylo v případě prvního i druhého vysušování. Lineární pokles teploty je výsledkem i posledního vysušování, kde bylo za úkol vysušit nejvyšší procento vlhkosti. V případě úbytku váhy po pauze se vzorky chovají stejně. I zde je z grafu patrný lineární pokles teploty, jako v ostatních případech.

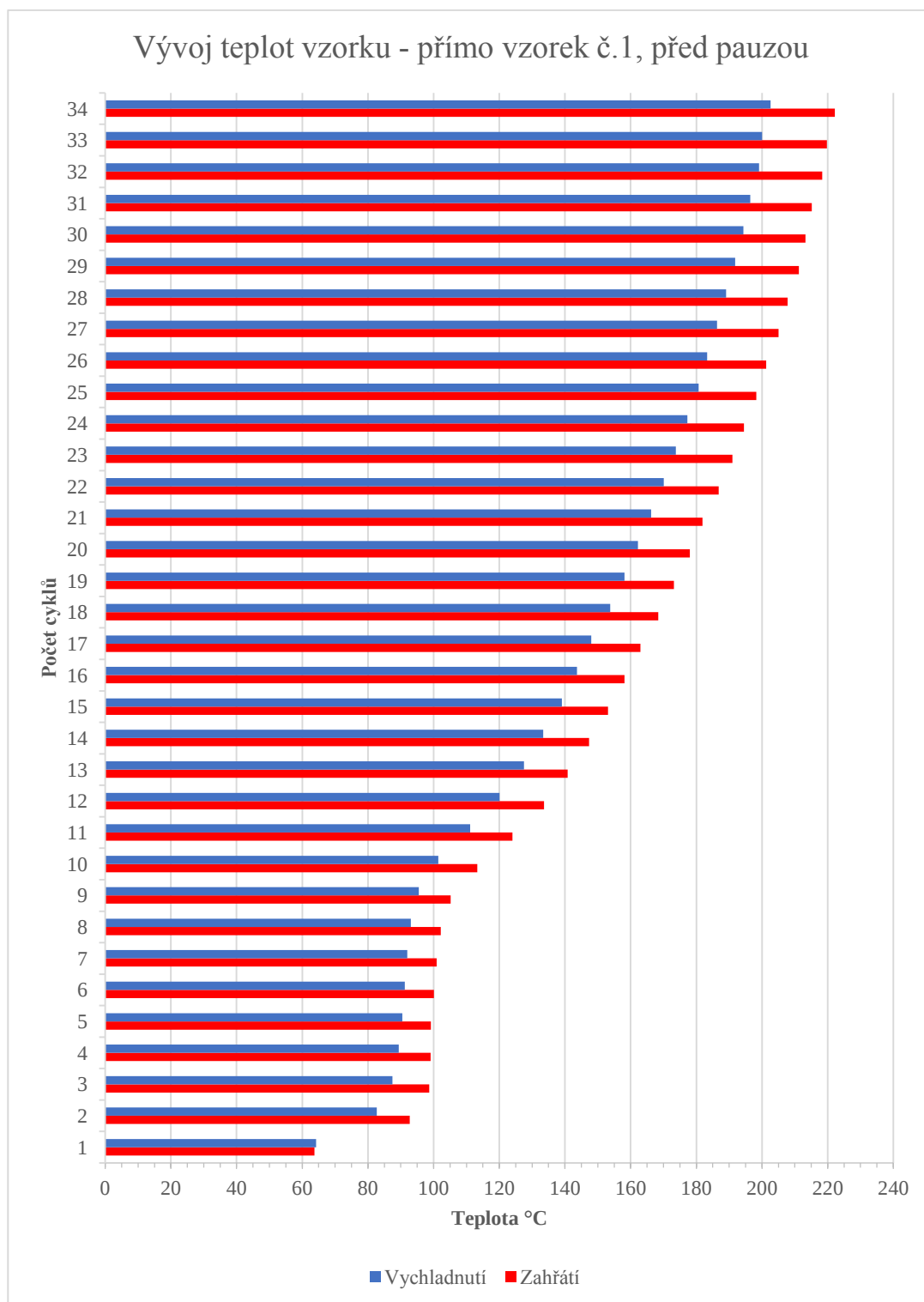


Graf 17) Úbytek hmotnosti vzorků – vlhkost 24%, po pauze

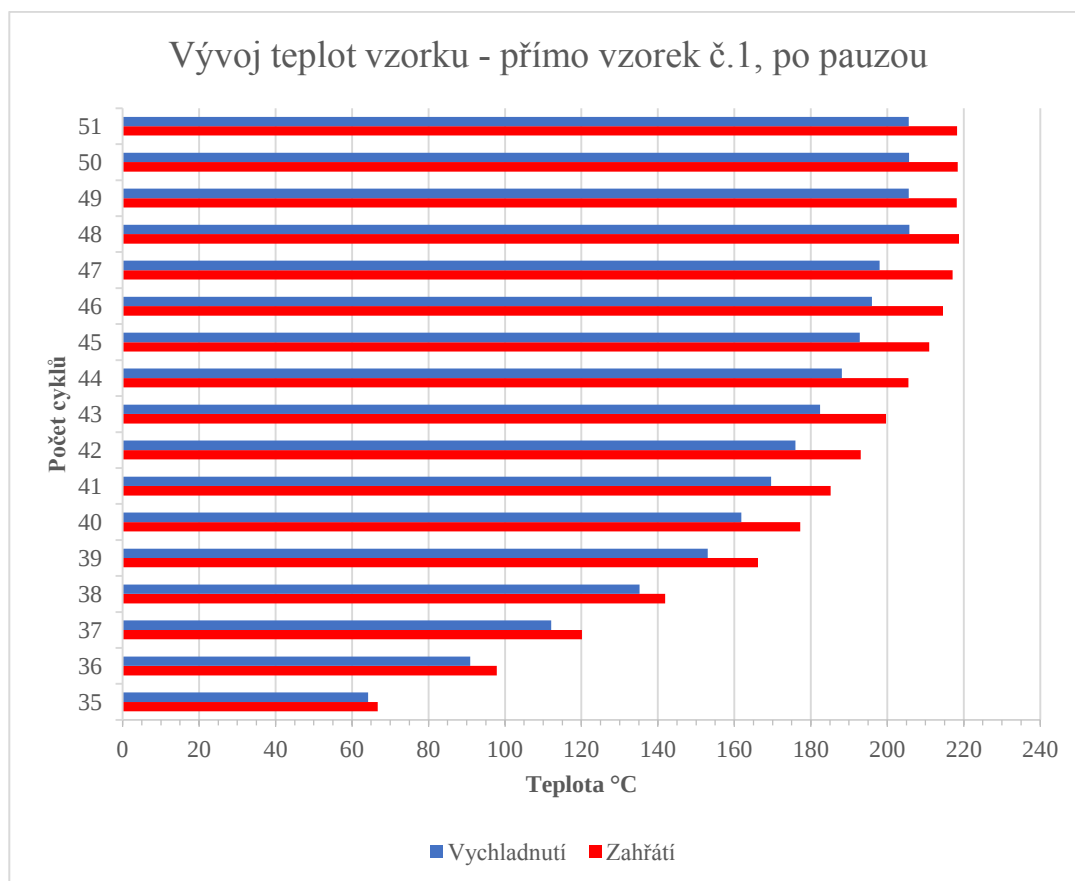
Graf vývoje vnitřních teplot opět zaznamenává počet cyklů a teplotu při odpovídajícím průběhu, tedy při zahřívání a vychlazování. Je tedy patrné množství obsažené vlhkosti ve vzorku z naměřených teplot. Dle legendy grafu je patrné, že červená barva sloupce patří k procesu zahřívání a modrá barva sloupce k procesu vychlazování.

Vývoj vnitřních teplot před pauzou je odlišný oproti vývoji teplot při 8% vlhkosti. Až vývoj vnitřních teplot po pauze je shodný a znovu je znázorněno, v konečných cyklech vysušování, ustálení teploty. Prvotní rozdílný vývoj je zapříčiněn vyšší vlhkostí vzorku a tím i vyšším počtem cyklování a mikrovlnné záření je v konfrontaci s daleko vyšší vlhkostí, než tomu bylo doposud. Při pohledu na grafy po pauze, kdy je dosaženo podle zvažované váhy daleko menší vlhkosti vzorku, je shodný průběh s dřívějším vysušováním dosažen. Lze tedy uvažovat, že v případě průběhu experimentu bez přerušení, by byl průběh v počátečních cyklech odlišný od průběhu při vysušování 8% vlhkosti, ale v konečné fázi experimentu by bylo dosaženo ustálení teplot.

Z grafu lze vyčíst vzrůst teploty při zahřívání a úbytek teploty při vychladnutí. Ve fázi před pauzou bylo dosaženo 34 cyklů a není patrné, že by teplota ustávala. Je tedy jasné, že ve vzorku je pořád obsažena vlhkost. Graf fáze po pauze má více exponenciální nárůst a v posledních cyklech je patrný ustálený stav, tedy známka vysušení vzorku. Zajímavým poznatkem je maximální dosažená teplota zahřívání přímo ozařované strany. V případě 8% vlhkosti byla maximální teplota vzorku okolo 220°C, v případě 24% vlhkosti bylo dosaženo podobné teploty jak v případě fáze před pauzou, tak v případě fáze po pauze.



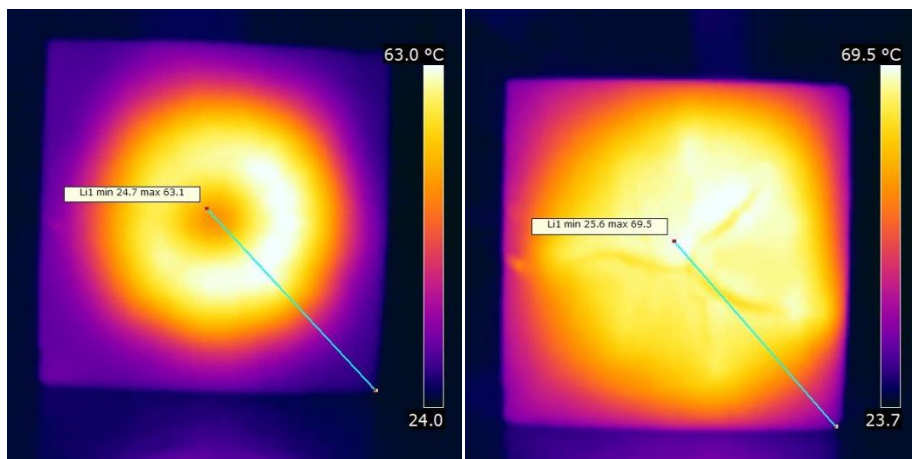
Graf 18) Vývoj teplot vzorku č.1 – přímo, před pauzou



Graf 19) Vývoj teplot vzorku č.1 – přímo, po pauzou

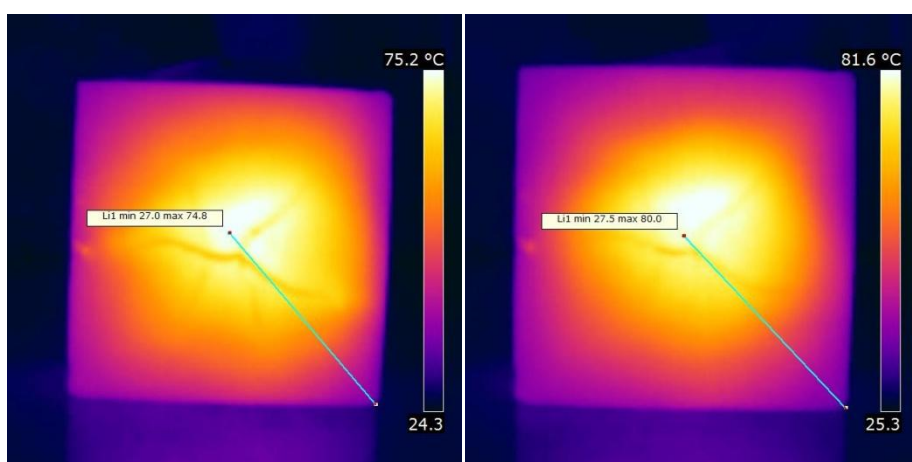
Při porovnávání grafů nebylo rozpoznáno žádných nepřesností, či rozdílů mezi jednotlivými vzorky. Zbývající grafy budou umístěny do přílohy diplomové práce.

Termosnímky opět byly nápomocné pro pochopení rozložení teplotního pole vlivem interakce mikrovlnného záření s vlhkostí a jejím postupným vysušováním. Díky termosnímům byly opět vytvořeny grafy, které znázorňují průběh povrchových teplot na jednotlivých stranách vzorků. Vlivem pauzy byly vytvořeny dva grafy pro každou stranu. Jeden graf je pro fázi před pauzou a druhý je pro fázi po pauze. Pro stranu přímo vystavenou ozařování nastala jedna malá změna. V prvních cyklech je střed chladnější a kolem středu je utvořen prstenec s vyšší teplotou, než je teplota středu. Při dalších cyklech se střed opět stává místem s nevyšší teplotou. I pro tento stupeň vlhkosti se projevuje kruhovým tvarem plochy maximálních teplot a od středu strany vzorku se teploty, směrem od středu vzorku, postupně snižují. Tento jev je tedy společný pro všechny tři experimenty.



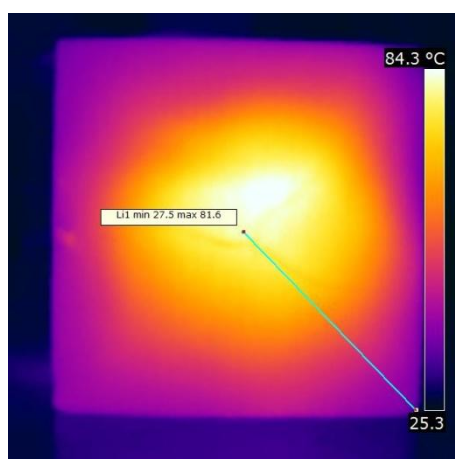
1.cyklus

10.cyklus



20.cyklus

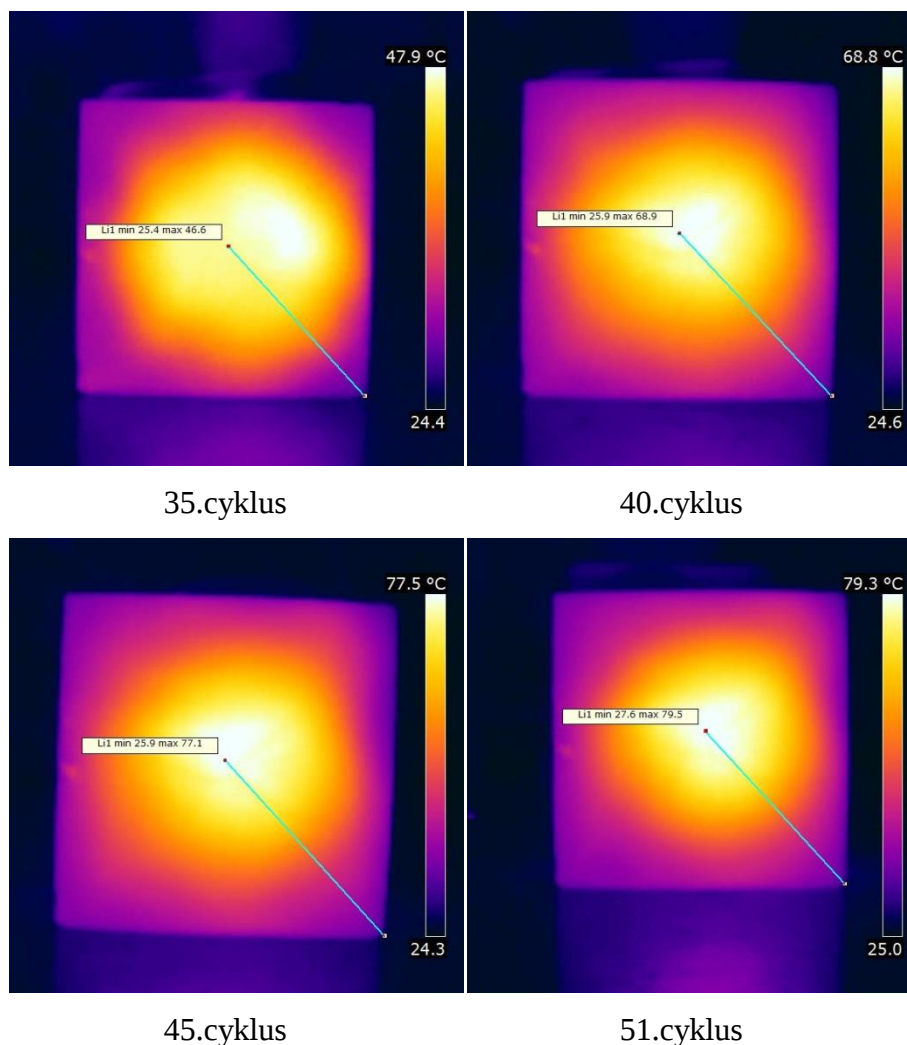
30.cyklus



34.cyklus

Obr.24) Průběh povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - přímo před pauzou

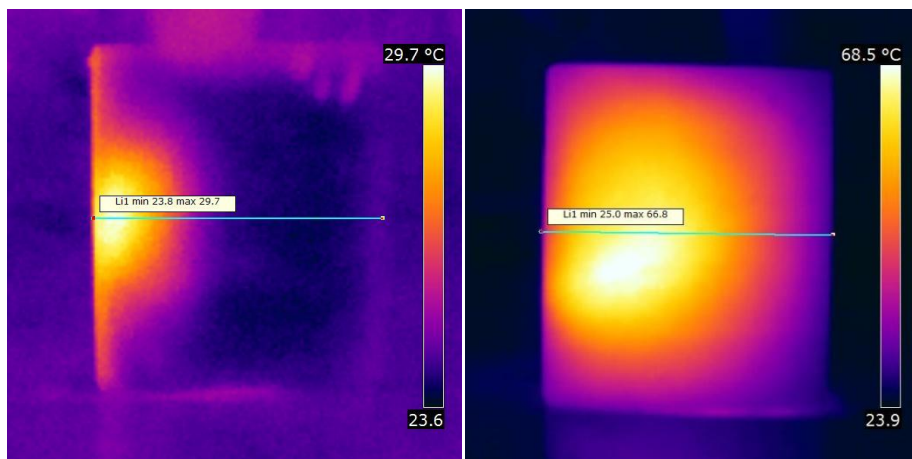
Z doložených termosnímků je patrná skutečnost popisována v dřívějším odstavci. Jedná se o termosnímký ve fázi před pauzou, následují termosnímký ve fázi po pauze.



Obr.25) Průběh povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - přímo po pauze

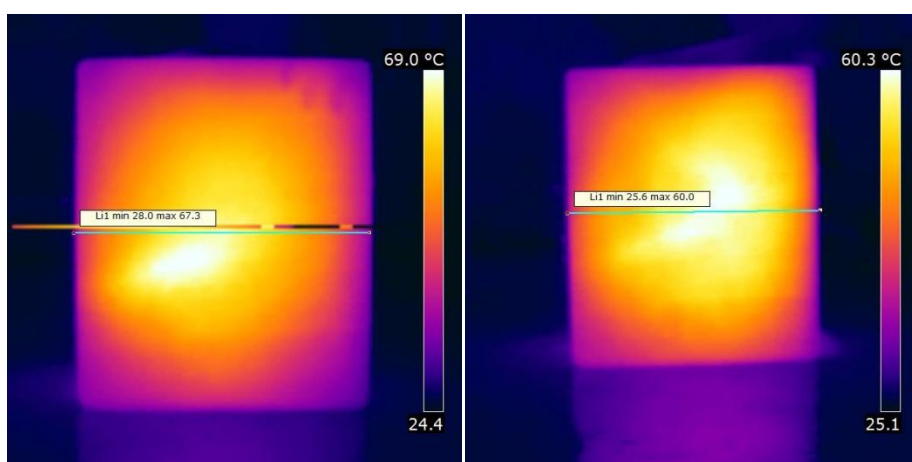
V průběhu po pauze už nejsou zaznamenány žádné změny. Teploty se vyšplhaly podobně vysoko, jako v případě ve fázi před pauzou.

Pro boční část je změna patrnější. Dle termosnímků je nejvyšší teplota v prvních cyklech blízko straně přímo ozařované. Postupným cyklováním dochází k přesunu maximálních teplot směrem ke středu strany vzorku. Plocha maximálních teplot není kruhového tvaru, ale připomíná oválný tvar, jako v předešlých případech vzorků.



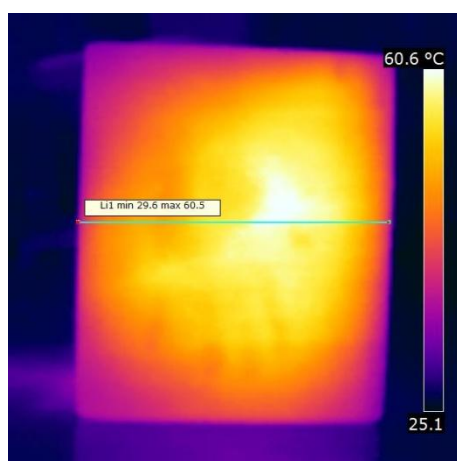
1.cyklus

10.cyklus



20.cyklus

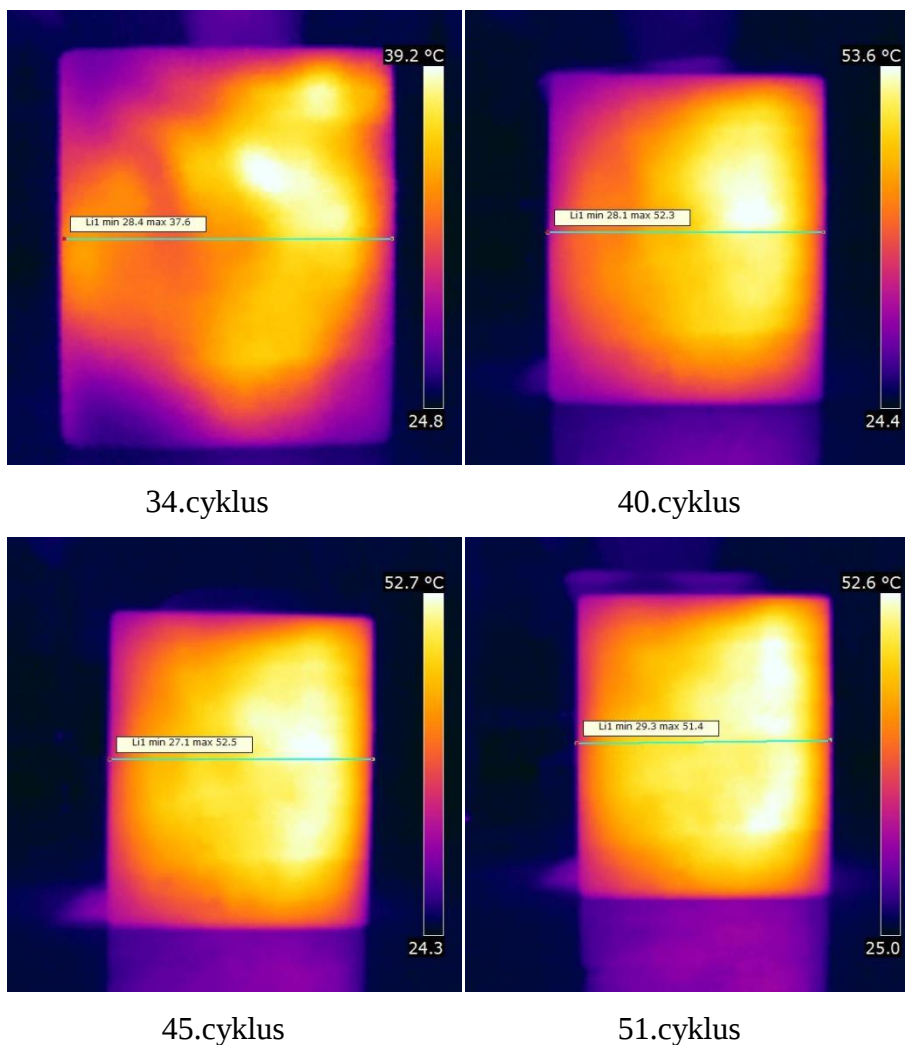
30.cyklus



34.cyklus

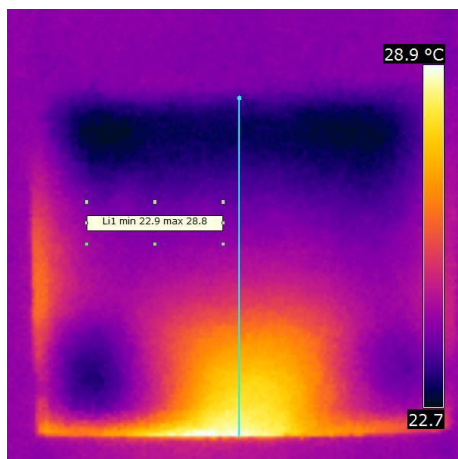
**Obr.26) Průběh povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - bok před
pauzou**

Po pauze se maximální teploty přesouvají dále od středu strany vzorku ke straně, která je naproti přímo ozařované straně vzorku. Vše je patrné z níže zobrazených termosnímků i v později zobrazených grafech.

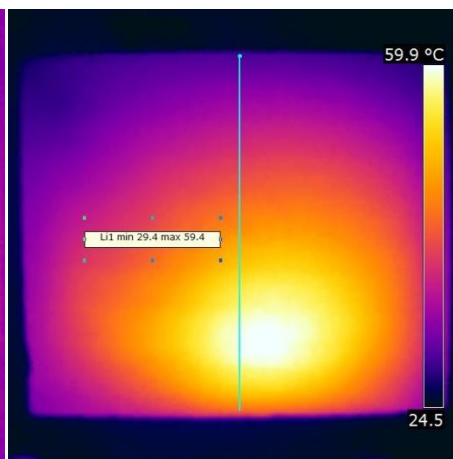


Obr.27) Průběh povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - bok po pauze

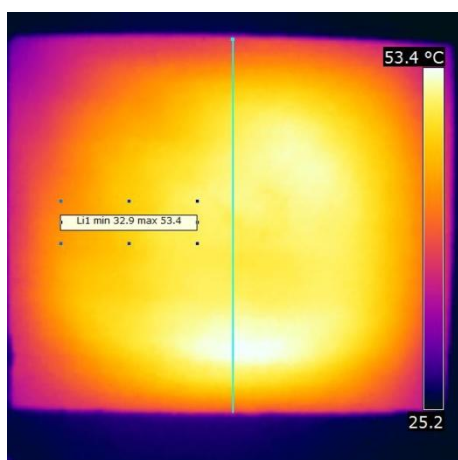
Stejný jev, co je zde popisován, se projevil i v případě vrchní strany vzorku. I zde je patrný posun oblasti s maximální povrchovou teplotou. Od ozařované strany se plocha přesouvá směrem ke středu strany vzorku a v pozdějších cyklech se přesouvá ke straně naproti straně ozařované. Tento pohyb maximální teploty je společný pro všechny vzorky, které byly zkoumány. Termosnímky jsou znázorněny na další straně.



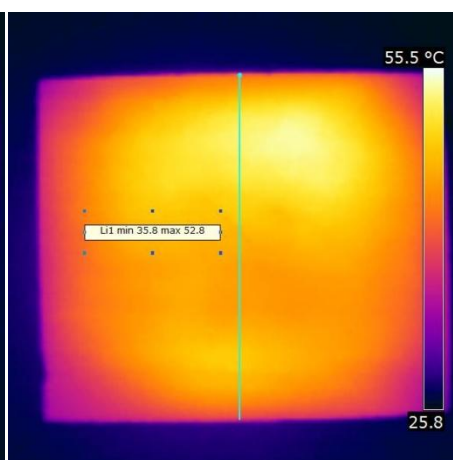
1.cykklus



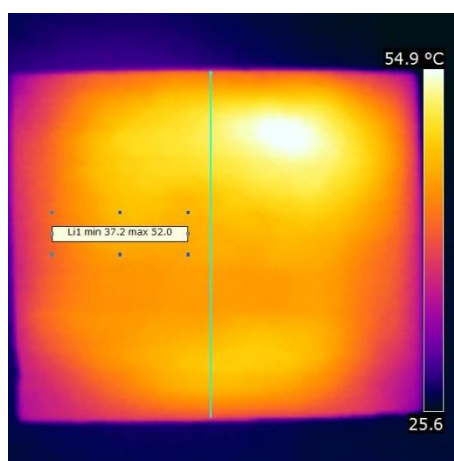
10.cykklus



20.cykklus

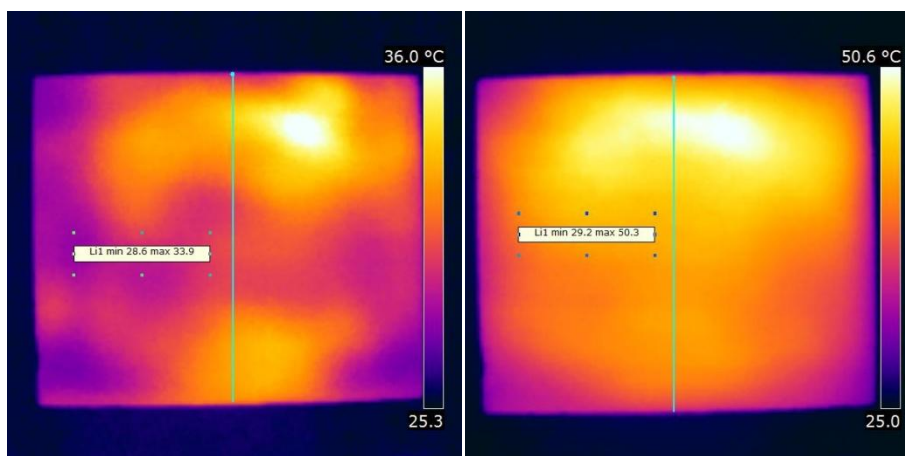


30.cykklus



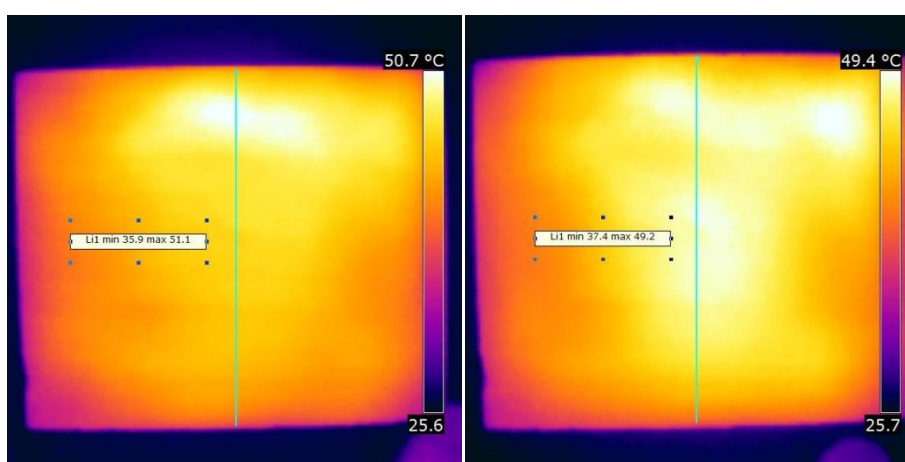
34.cykklus

Obr.28) Průběh povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - vrch před
pauzou



34.cyklus

40.cyklus

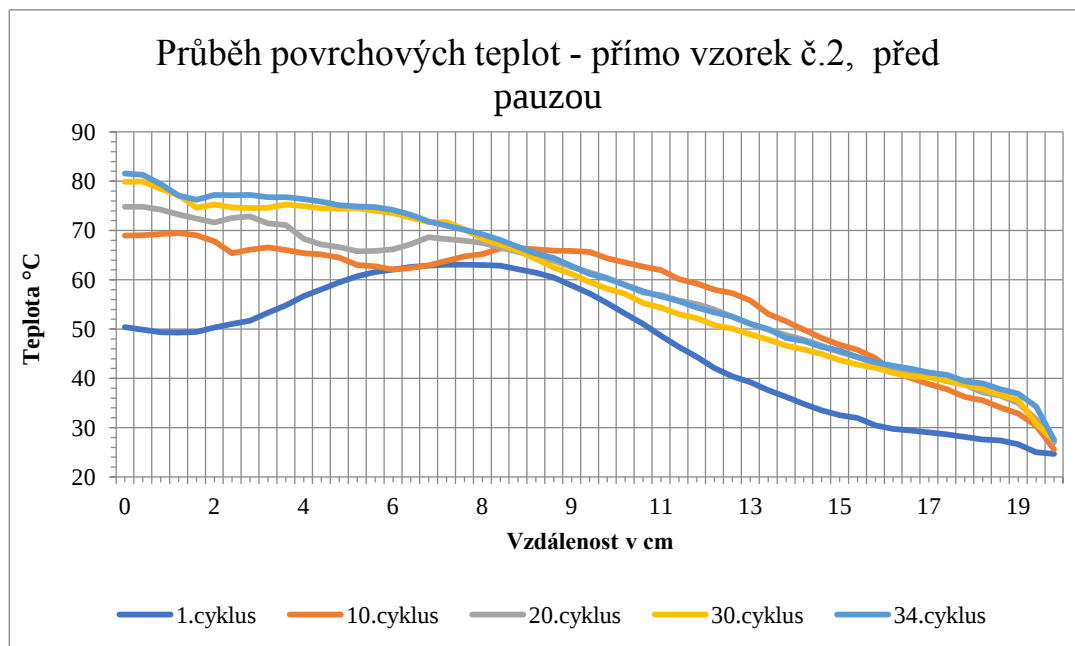


45.cyklus

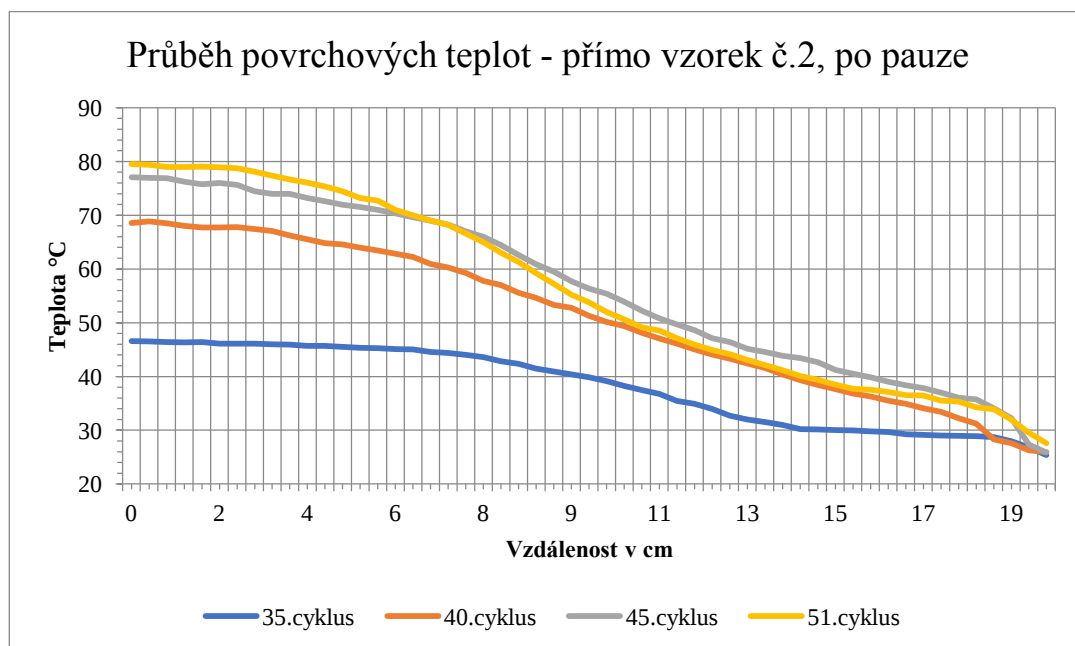
51.cyklus

Obr.29) Průběh povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - vrch po pauze

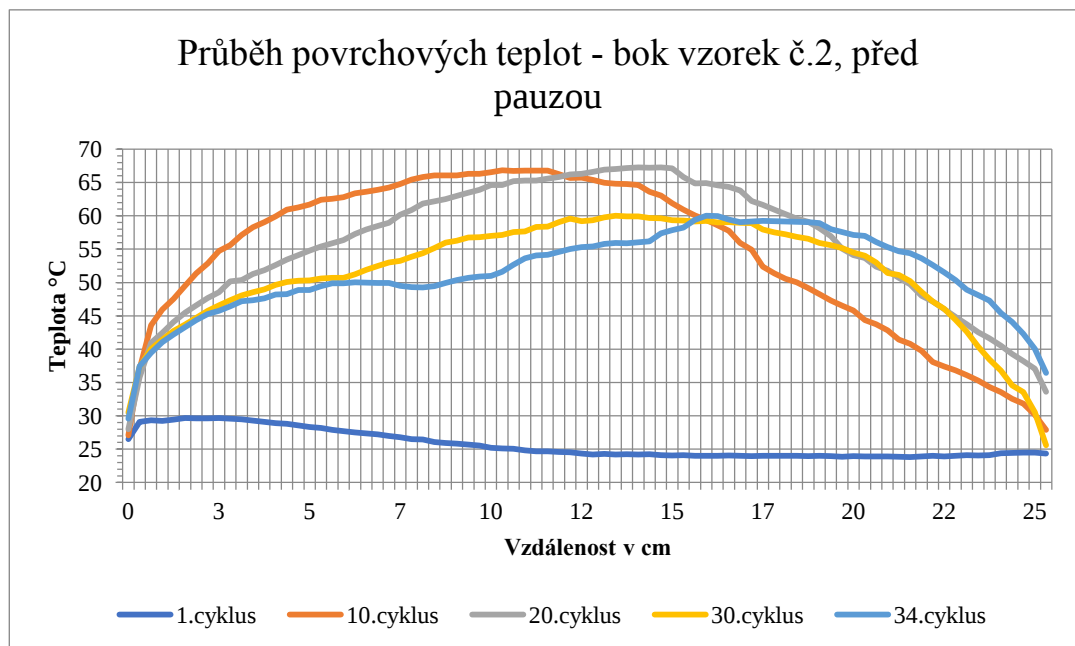
Plocha maximální povrchové teploty je oválného tvaru. Pohyb je vidět i na grafech vytvořených pro lepší představu teplotního pole. Grafy průběhu povrchových teplot potvrzují pohyb maximálních teplot na vrchní a boční straně zkoumaných vzorků. Z toho důvodu mají odlišný průběh, než v případě 3% a 8% vlhkosti. Můžeme tedy říci, že teploty znázorňují pohyb vlhkosti ve vzorku a díky vysušování se vlhkost vypařuje v podobě vodní páry ze vzorku, mikrovlny prochází dál vzorkem a zahřívají vlhkost v jiném místě. To se projevuje pohybem maximálních teplot po straně vzorku, která je viditelná na přiložených termosnímecích, či vytvořených a přiložených grafech níže.



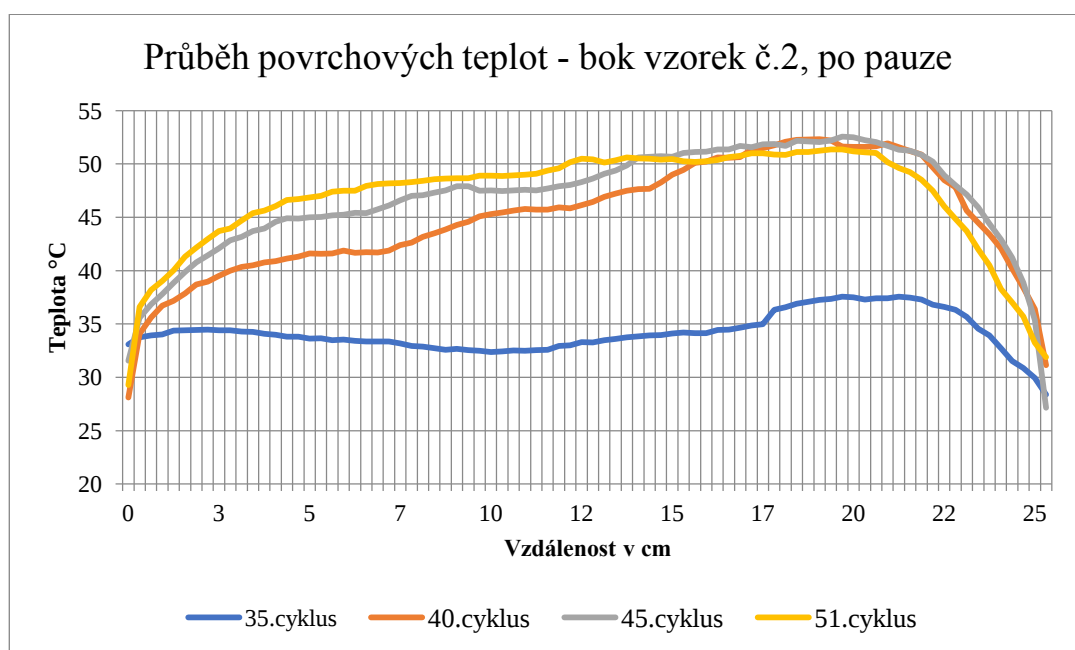
**Graf 20) Průběh povrchových teplot – přímo vzorek č.2 při 24%, před
pauzou**



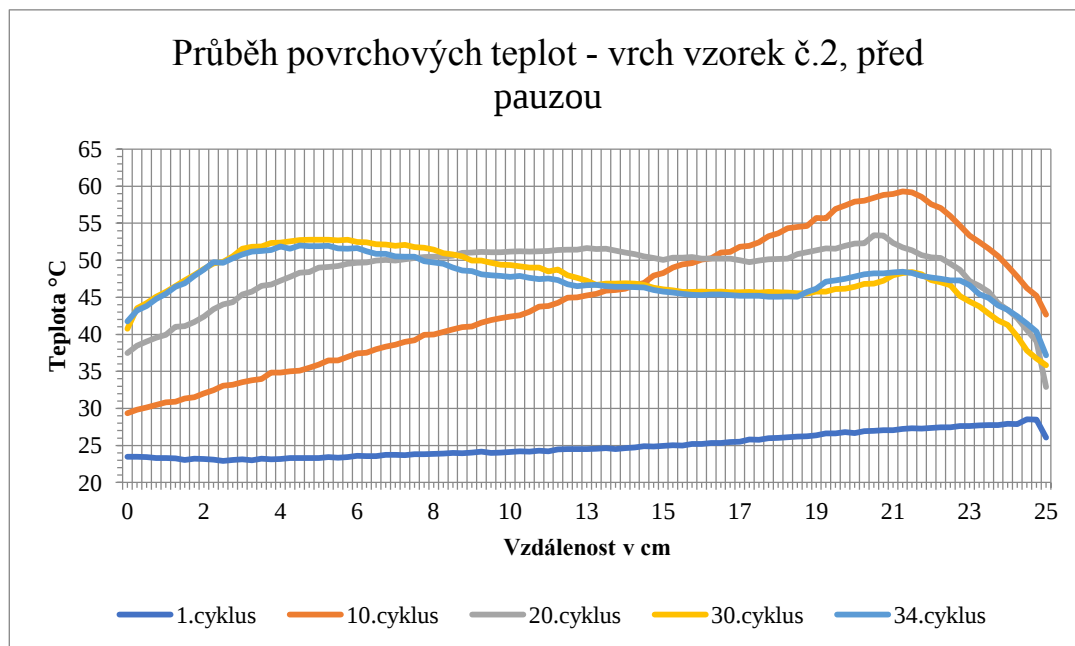
Graf 21) Průběh povrchových teplot – přímo vzorek č.2 při 24%, po pauze



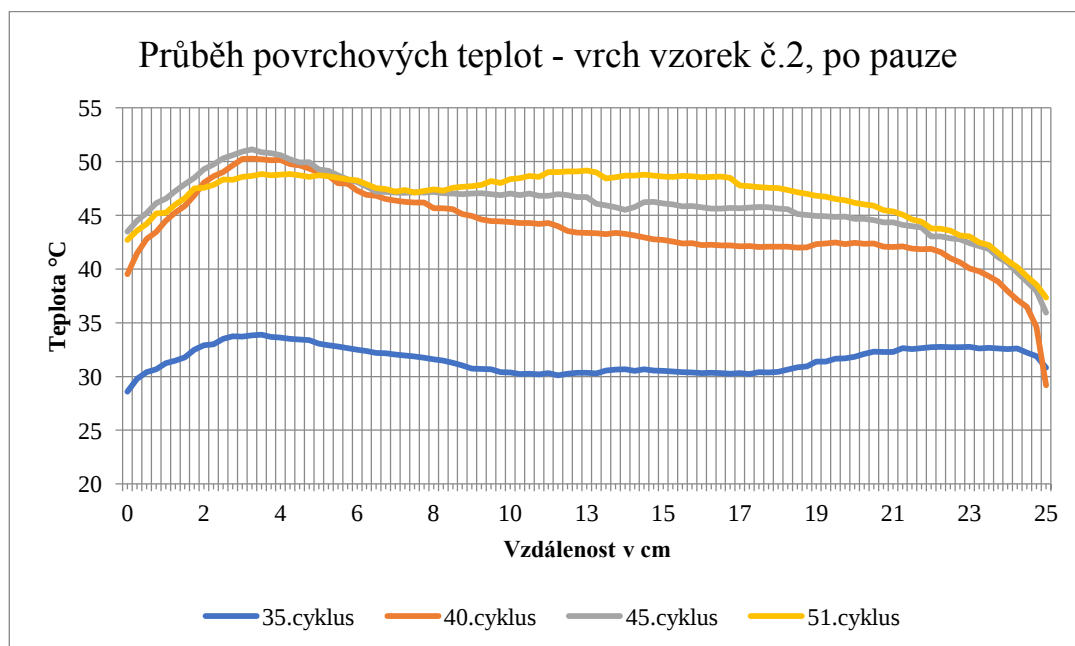
Graf 22) Průběh povrchových teplot – bok vzorek č.2 při 24%, před pauzou



Graf 23) Průběh povrchových teplot – bok vzorek č.2 při 24%, po pauze



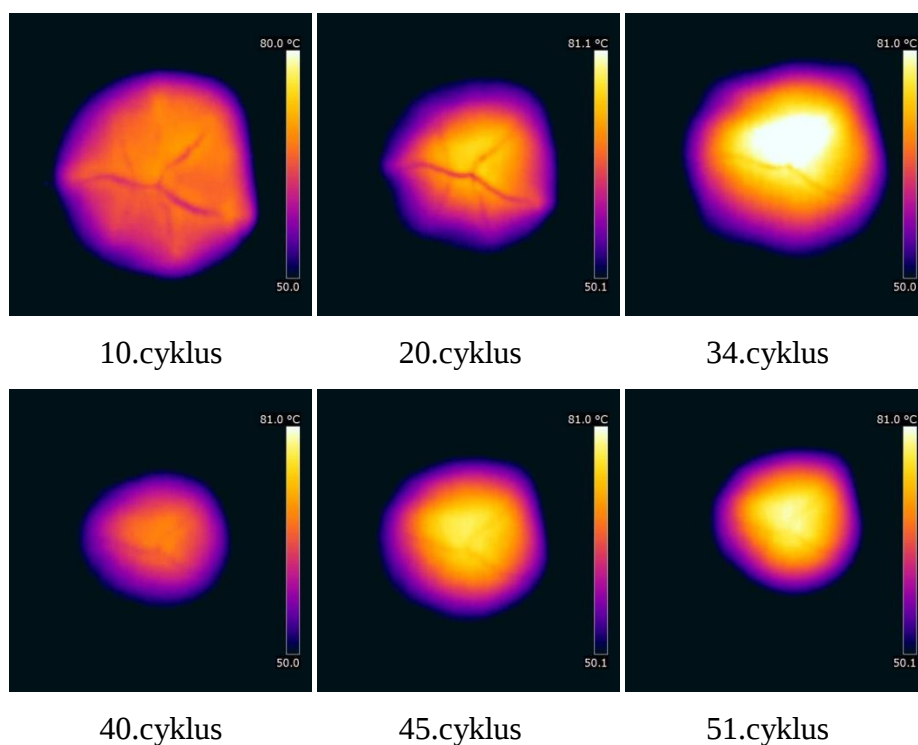
**Graf 24) Průběh povrchových teplot – vrch vzorek č.2 při 24%, před
pauzou**



Graf 25) Průběh povrchových teplot – vrch vzorek č.2 při 24%, po pauze

Při pohledu na nárůst plochy s maximální povrchovou teplotou není zaznamenána žádná směna, oproti dříve zmíněnými nárůsty. Opět je vidět poměrně

nemění kruhový průměr plochy a spíše nárůst maximální povrchové teploty. Snímky znázorňují teplotní rozmezí od 50°C do 81°C.



Obr.30) Nárůst povrchových teplot vzorku č.2 při vlhkosti 24% - přímo

5.4. Shrnutí výsledků experimentu

Rozložení teplotního pole

Pokud si shrneme výsledky jednotlivých vysoušecích fází, můžeme říci, že teplotní pole se rozkládá směrem od generátoru mikrovln. Při malém procentu nasycení vlhkostí se teplotní pole šíří od středu vzorku a postupně směrem k hraně vzorku teploty klesají. Z grafů je tedy patrný parabolický průběh teplotního pole na jednotlivých stranách vzorku.

Při přímém kontaktu vzorku s vodou a s tím spojené nejvyšší nasycení vlhkosti dochází k pohybu maximálních povrchových teplot. Tento pohyb je způsoben postupným vypařováním vlhkosti ze vzorku. Cyklováním se vypařuje vlhkost, která je umístěna blíže ke generátoru mikrovln. Později mikrovlnné záření proudí dále do vzorku a vysušuje vlhkost i v těchto místech.

Podle naměřených teplot pomocí teploměru byly nejvyšší teploty na straně přímo ozařované, druhá nejvyšší teplota byla naměřena na boční straně vzorku. Z tohoto

faktu usuzují, že tyto strany jsou nejjednodušší cestou úniku pro horkou páru ze vzorku ven. Tato hypotéza je založena pouze na chování vzorků v laboratorních podmínkách. Při osazení ve zdivu mohou být tyto výsledky popřeny.

Účinnost zařízení

Účinnost sanace pomocí mikrovlnného záření se ukazuje, jako velmi účinná a kvalitní. Při experimentu bylo dosaženo po jednotlivých cyklech úbytku váhy v rozmezí 5 až 70g hmotnosti vzorku. Úbytek hmotnosti je důkazem zbavení se části vlhkosti. Díky experimentu je možné určit přibližnou dobu sanace určité stupně vlhkosti. Z hlediska časové náročnosti se metoda jeví jako jedna z rychlejších metod pro vysušení vlhkosti z materiálu.

Pro laboratorní podmínky bylo potřeba 16 cyklů na vysušení 3% vlhkosti obsažené ve vzorku. Jeden cyklus je roven 20 minutám, to znamená, že celkový čas pro vysušení tohoto stupně vlhkosti je 320 minutám, tedy 5 hodinám a 20 minutám. Pro vysušování 8% vlhkosti proběhlo 30 cyklů, takže čas potřebný pro vysušování se zastavil na 600 minutách, tedy 10 hodinách. Pokud nebudeme uvažovat pauzu při vysušování 24% vlhkosti, bylo průměrně potřeba 51 cyklů. Takový počet cyklů vyžaduje 1020 minut, čili 17 hodin. Tyto čísla mluví ve prospěch účinnosti této metody sanace, musíme si však uvědomit, že se jedná o experiment v laboratorních podmínkách a vysoušen byl vzorek o velikosti cca 300x250x290 milimetrů. Pro sanaci v praxi se může tato doba, která byla potřebná pro sanaci v laboratorních podmínkách, lišit z důvodu zabudování materiálu do konstrukce, okolním prostředím, či působení vlhkosti ve větším objemu, než v případě experimentu.

Finanční náročnost vysoušení

Finanční náročnost celého procesu sanace pomocí mikrovlnného vysoušení je častý argument, proč tuto metodu nevyužívat. Pro upřesnění této problematiky byla vytvořena tabulka, kde je sledován čas spuštění přístroje pro potřebu vysoušení určitého stupně vlhkosti ve zkoumaném vzorku. Vše vychází z naměřených cyklů, kde pro jeden cyklus platí, že přístroj běží 10 minut. K výpočtu ceny je uváděna průměrná cena za kilowatthodinu, která byla stanovena na 5 Kč/kWh. Je znám i příkon přístroje, který má hodnotu 1100W. Z těchto známých veličin je utvořena následující tabulka:

Tab. 10) Spotřeba energie a cena za spotřebovanou energii

Vlhkost	Doba spuštění přístroje	Spotřeba energie [kWh]	Cena [Kč]
3%	2 hodiny a 40 minut	2,93	15
8%	5 hodin	5,50	28
24%	8 hodin a 30 minut	9,35	47

Tato tabulka znázorňuje spotřebu a cenu za energii pro jednotlivé stupně nasycení vlhkostí. Musíme si uvědomit, že se jedná pouze o vysušení jednoho vzorku jedním přístrojem. Tato tabulka je základem pro vytvoření tabulky, kde je celková finanční náročnost celého experimentu.

Tab. 11) Celková cena energií za experiment

Vlhkost	Cena vysušení vzorku	Počet vzorků	Celková cena
3%	15,-	8	120,-
8%	28,-	8	224,-
24%	47,-	8	379,-
Celková cena energií za experiment			723,-

Celková cena se nezdá být příliš závratná, ale musíme si uvědomit, že se jedná pouze o jeden přístroj a vysoušení malé plochy vzorku v laboratorních podmínkách. V praxi se využívá více přístrojů pro vysušení větších částí postižených vlhkostí. V takovém případě bude odběr elektrické energie vyšší a celý proces o poznání dražší. S tvrzením, že sanace pomocí mikrovlnného záření, je finančně náročná, je potvrzena. Přístroje, pro potřebný výkon pro vysoušení, potřebují dostatek energie a s časem potřebným pro vysoušení se zvyšuje doba, po kterou tuto energii odebírají. V budoucnu cena energií ještě poroste a celkové náklady na vysoušení pomocí mikrovlnných generátorů se zvýší.

6. ZÁVĚR

6.1. Zjištěné poznatky

Interakce mikrovlnného záření s vlhkostí je složitý proces, při němž probíhá řada dějů. Mikrovlny proudí materiálem vzorku a střetávají se s vlhkostí, která má v zásadě kapalně skupenství a je umístěná v pórech. Při jejich vzájemném střetu mikrovlny rozkmitají molekuly vody, při pohybu molekul vzniká teplo. Čím více molekul vody je vystaveno mikrovlnám, tím více roste teplota, kterou lze naměřit. Teplota je tedy jasným ukazatelem střetu – interakce mikrovlnného záření a vlhkosti v pórovitém materiálu. Materiál přebírá vzniklou teplotu a zahřívá se díky tomuto procesu. Důležitou součástí je doba, při které vzorek není vystaven mikrovlnnému záření a vlhkost pouze pomalu vydychává. Rozkmitáním molekul vody vzniká teplo, které mění skupenství vody z plynného na kapalně a tím dochází k odparu vlhkosti. Mikrovlny tlačí tuto formu vlhkosti před sebou a ta nemá možnost opustit vzorek, protože jí v tom z jedné strany brání mikrovlny a z druhé vyplnění pórů vodou. Při přerušení ozařování, tedy cyklickém vysoušení mikrovlnným zářením, má vlhkost možnost prostoupit skrze póry ven ze vzorku. Přerušení ozařování je tedy nezbytné pro správné a účinné vysušování, neboť právě při vydychávání vzorku vlhkost vzorek opouští nejintenzivněji. To je zásadní zejména při vysoušení zdiva, kdy má vodní pára možnost expandovat pouze čelní, nebo zadní stranou ozařovaného zdiva. Vlhkost se snaží opustit vzorek nejkratší možnou cestou, pokud ovšem vzorek opět vystavíme záření, vlhkost v podobě vodní páry je zatlačena zpět do vzorku a dochází opět ke změně skupenství vody na páru. Lze zjednodušeně říci, že mikrovlnné záření zdivo vysušuje jednak odparem vodních par – to je ta nejvýznamnější složka vysoušení, ale také vytlačování vody ze zdiva. Nejedná se ale v žádném případě o jediné vysoušecí procesy, ale můžeme je označit za zásadní.

Experiment potvrdil již předešlé práce, které se zabývaly stejným, či podobným tématem. Sanace touto metodou je efektivní a její využití v praxi by mělo být více využíváno. Při správné manipulaci a nastavení vysušování nevznikají žádná rizika poškození materiálu, či škodlivosti na zdraví osob, žijících v objektu, nebo obsluhy aparátu. V kombinaci s dalšími sanačními opatřeními, jako jsou například vysoušeče vzduchu, může metoda dosahovat ještě vyšší efektivity vysoušení. Vyšší efektivita

může zkrátit dobu potřebnou pro vysoušení a tím i snížit náklady potřebné pro celý proces. Nicméně experiment potvrdil účinnost této metody.

Teplotní pole se rozkládá podle rozložení vlhkosti ve vzorku. Potvrdila se predikce výskytu maximálních teplot v místech vypařování vlhkosti. Mikrovlny nejdříve vypaří vlhkost blíže generátoru vlhkosti, poté proudí dále vzorkem a vypařují vlhkost v dalších místech vzorku. Celá problematika teplotního pole a jeho rozložení je složitá. Pro určení byly použity data z termosnímků a optovláknového teploměru. Nebyl vytvořený žádný matematický model.

Finanční náročnost byla probrána u dřívější kapitole. Potvrdila se náročnost procesu po stránce odběru energií a s tím spjaté ceně, za vysoušení pomocí generátoru mikrovln. S trendem rostoucích cen za energie je předpoklad, že finanční náročnost metody poroste. Cena metody může být překážkou pro její použití. Pro investora není rozhodující pouze efektivita sanace, ale i její cena. Pokud cena vzroste, nebude o tuto metodu tak velký zájem.

Návaznost dalších experimentů a výzkumů na tuto diplomovou práci se může upínat různým směrem. Jednou z možností může být nastavení optimálního cyklování. Pro tento experiment bylo zvoleno 10 minut ozařování a 10 minut vydýchávání. Najít optimální cyklování, při kterém dojde k nejvyššímu úbytku váhy bez porušení vzorku, může pomoci k vyšší efektivitě celé metody. Další možnost je zkoumání a rozšíření poznatků o šíření teplotního pole a doplnění matematického modelu.

Samotná problematika využití mikrovlnného záření ve stavebnictví je velmi složitá. Každý výzkum, či pokus dopomáhá k lepšímu porozumění této problematice a k efektivnějšímu využití mikrovln ve stavebním odvětví.

7. Citované zdroje

- [1] ŠUHAJDA, Karel. *Sanace vlhkého zdiva staveb: Využití tyčové antény při mikrovlnném vysoušení zdiva*. Brno, 2006. Disertační práce. VUT v Brně.
- [2] *Listy chemické: orgán chemické společnosti: Spolek chemiků českých*. V Praze: Spolek chemiků českých, 1877-, 2008(102). ISSN 1803-3288.
- [3] KAREL, Petr. Hygroskopie. *Wikipedia* [online]. Praha: Wikipedia, 2010 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hygroskopie>
- [4] KUPILÍK, Václav. Optimální volba sanační metody u objektů zasažených vlhkostí (1. část). <https://stavba.tzb-info.cz> [online]. Praha: Václav Kupilík, 2001, 2.12.2013 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/regenerace-domu/10650-optimalni-volba-sanacni-metody-u-objektu-zasazenych-vlhkosti-1-cast>
- [5] BURGETOVÁ, Eva. Průzkumy a diagnostika staveb se zvýšenou vlhkostí. <https://www.asb-portal.cz> [online]. Praha: JAGA Media, 2007, 14.12.2007 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/hydroizolace-zakladu/pruzkumy-a-diagnostika-staveb-se-zvysenou-vlhkosti>
- [6] VENHODOVÁ, Ester. *VLASTNOSTI DŘEVA RŮZNÉHO STÁŘÍ S OHLEDEM NA TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Jan Vaněrek.
- [7] BABÁK, Tomáš. *Metody sanace zdiva proti zemní vlhkosti*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Rostislav Šulc.
- [8] SOLAŘ, Jaroslav. *Odstraňování vlhkosti: Sanace vlhkého zdiva*. 1. Praha: Grada Publishing a.s, 2013. ISBN 9788024786063.
- [9] DROCHYTKA, Rostislav, Jaroslav VÝBORNÝ, Pavel KOŠATKA a Dimitrij PUME. *Pórobeton*. 1. Brno: VUTIUM, 1999.
- [10] ŠIMOVIČ, Juraj a Oto VRANA. *Pórobeton v stavebníctve*. 1. Bratislava: Alfa, 1987.
- [11] *Ytong.cz* [online]. Hrušovany u Brna [cit. 2019-10-08]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/ke-stazeni.php>
- [12] PACÁKOVÁ, Lucie. *Vliv vlhkosti na objemové změny pórobetonu*. Žilina, 2007. Studentská vědecká odborná činnost. Žilinská univerzita. Vedoucí práce Martin Krejsa.
- [13] ŠUHAJDA, Karel. *Analýza interakce mikrovlnného záření s vlhkostí v prostředí pórovitého staviva*. Brno, 2016. Habilitační práce. VUT.

- [14] Difúze vodní páry v konstrukci. <https://www.stavebnictvi3000.cz/> [online]. Hradec Králové: VEGA, 2005, 2005 [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/difuze-vodni-pary-v-konstrukci>
- [15] Vodní pára a její kondenzace v konstrukcích. <https://stavba.tzb-info.cz> [online]. Praha: Topinfo, 2001, 15.5.2006 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/3285-vodni-para-a-jeji-kondenzace-v-konstrukcich>
- [16] BALÍK, Michael. *Vysušování zdiva*. 3., upr. vyd. Praha: Grada, 2002. ISBN 80-247-0438-2.
- [17] SOLAŘ, Jaroslav. *Odstraňování vlhkosti: sanace vlhkého zdiva*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4708-8.
- [18] BALÍK, Michael. *Odvhlčování staveb*. 2., přeprac. vyd. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 978-80-247-2693-9.
- [19] MRLÍK, František. *VLHKOSTNÉ PROBLÉMY STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ V KONŠTRUKCII*. 1. Bratislava: Alfa, 1985. ISBN 9955
- [20] VRBA, Jan. *Úvod do mikrovlnné techniky*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03670-9.
- [21] KRÁLOVÁ, Magda. Mikrovlny. <https://edu.techmania.cz> [online]. Plzeň: Techmania Science Center [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticke-vlny/mikrovlny>
- [22] SOBOTKA, Jindřich, Karel ŠUHAJDA a Zdeněk JIROUŠEK. Mikrovlnná teorie ve stavební praxi. <https://stavba.tzb-info.cz> [online]. Praha: Topinfo, 2017 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/15568-mikrovlenna-teorie-ve-stavebni-praxi>
- [23] MAZÁNEK, Miloš, Pavel PECHAČ a Jan VRBA. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03997-7.
- [24] VRBA, Jan. *Lékařské aplikace mikrovlnné techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2705-8.
- [25] NOVOTNÝ, Miloslav. *Nedestruktivní měření vlhkosti stavebních látek pomocí mikrovlnného záření*. Brno, 1999. Habilitační práce. VUT.
- [26] Mikrovlnné záření ve stavebnictví. <https://www.stavebnictvi3000.cz> [online]. Hradec Králové: VEGA, 2003, 2003 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/mikrovlenne-zareni-ve-stavebnictvi>

- [27] PTÁČEK, Petr a Monika TERESEŠOVÁ. Použití mikrovlnného záření na likvidaci biotického napadení a vysoušení dřevostaveb. *Https://stavba.tzb-info.cz* [online]. Praha: Topinfo, 2014 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/11741-pouziti-mikrovlneho-zareni-na-likvidaci-biotickeho-napadeni-a-vysouseni-drevostaveb>
- [28] *Měření vlhkosti zdiva, domů a diagnostika staveb* [online]. Praha: TRUMF, 2017 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <http://www.sanace-zdiva-praha.cz/mereni-vlhkosti-zdiva/>
- [29] PAZDERKA, Jiří a Eva HÁJKOVÁ. Použití odporové metody ke stanovení vlhkosti zdiva historických budov. *Stavební obzor*. 2014, 5(6), 91. ISSN 1804-8692.
- [30] KRÁLOVÁ, Magda. Elektromagnetické vlnění. *Https://edu.techmania.cz* [online]. Plzeň: Techmania Science Center [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticke-vlny/elektromagneticke-vlneni>
- [31] ÉDES, Zoltán. *Lokalizované plazmové rezonance a fotoluminiscence*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Tomáš Šíkola.
- [32] KRÁLOVÁ, Magda. Sytá a přehřátá pára. *Https://edu.techmania.cz* [online]. Plzeň: Techmania Science Center [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/syta-prehrata-para>
- [33] Generátory a komponenty. *Http://www.romill.cz* [online]. Brno: ROmill [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.romill.cz/cz/generatory-a-komponenty>
- [34] Fiber optic temperature monitoring system. *Http://www.optocon.de* [online]. Dresden: Weidmann [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.optocon.de/en/products/discontinued-products/fotemp-trafo-fiber-optic-single-channel-thermometer/>
- [35] Termokamera FLIR. *Https://www.termokamery-flir.cz* [online]. Praha: W-Technika group [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-e4-flir-e5-flir-e6-flir-e8-prumysl/>

8. Přílohy

VZOREK	PŮVODNÍ VÁHA [kg]	CYKLUS 10min	VÁHA kg
Č.3	8,87	1	8,868
		2	8,856
		3	8,844
		4	8,830
		5	8,814
		6	8,796
		7	8,776
		8	8,760
		9	8,742
		10	8,726
		11	8,710
		12	8,696
		13	8,684
		14	8,672
		15	8,662
		16	8,652
Č.4	9,14	1	9,140
		2	9,132
		3	9,122
		4	9,110
		5	9,096
		6	9,080
		7	9,064
		8	9,046
		9	9,030
		10	9,010
		11	8,994
		12	8,980
		13	8,968
		14	8,956
		15	8,944
		16	8,934

Příloha č.1) Tabulka úbytku hmotnosti při 3% vlhkosti, vzorek č.3 a č.4

VZOREK	PŮVODNÍ VÁHA kg	CYKLUS 10min	VÁHA kg
Č.5	8,83	1	8,826
		2	8,820
		3	8,812
		4	8,804
		5	8,796
		6	8,784
		7	8,772
		8	8,760
		9	8,748
		10	8,738
		11	8,726
		12	8,718
		13	8,708
		14	8,698
		15	8,690
		16	8,682
Č.6	8,93	1	8,926
		2	8,920
		3	8,910
		4	8,902
		5	8,892
		6	8,882
		7	8,872
		8	8,860
		9	8,850
		10	8,840
		11	8,830
		12	8,822
		13	8,812
		14	8,804
		15	8,796
		16	8,788

Příloha č.2) Tabulka úbytku hmotnosti při 3% vlhkosti, vzorek č.5 a č.6

VZOREK	PŮVODNÍ VÁHA kg	CYKLUS 10min	VÁHA kg
Č.7	9,28	1	9,274
		2	9,266
		3	9,258
		4	9,242
		5	9,232
		6	9,222
		7	9,216
		8	9,210
		9	9,200
		10	9,190
		11	9,182
		12	9,172
		13	9,162
		14	9,152
		15	9,142
		16	9,129
Č.8	8,86	1	8,858
		2	8,850
		3	8,842
		4	8,832
		5	8,822
		6	8,812
		7	8,800
		8	8,792
		9	8,786
		10	8,778
		11	8,770
		12	8,762
		13	8,752
		14	8,745
		15	8,735
		16	8,725

Příloha č.3) Tabulka úbytku hmotnosti při 3% vlhkosti, vzorek č.7 a č.8

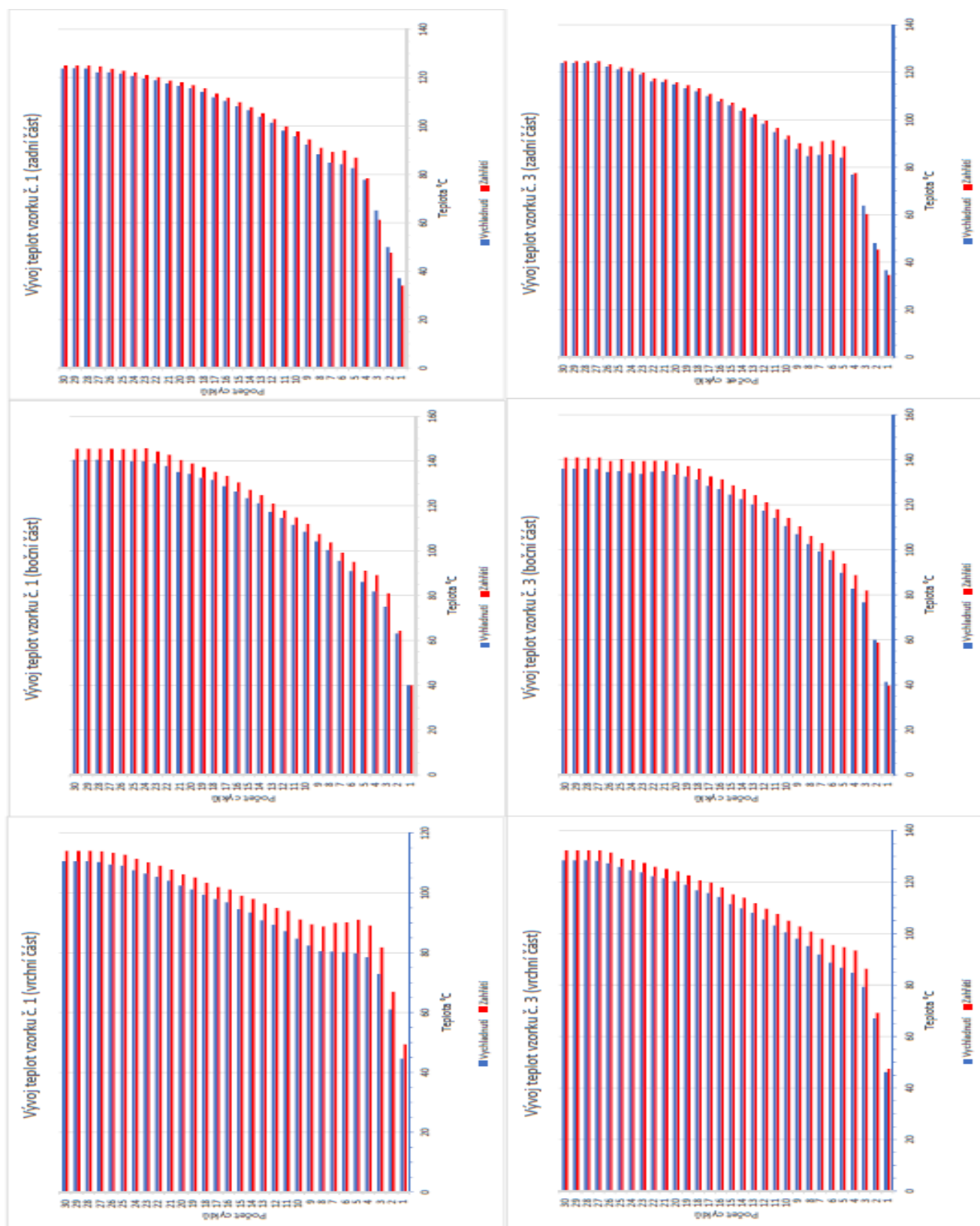
odrazivost matný E=0,95		TEPLOTA [°C]								
VZOREK	PŮVODNÍ VÁHA [kg]	CYKLUS [10min]	VÁHA [kg]	senzor 1 (přmo)	senzor 2 (vrch)	senzor 3 (bok)	senzor 4 (zadek)			
Č.1	9,356	1	9,300	93,5	78,5	49,4	44,6	40	40	34,1
		2	9,254	115,2	103	66,9	61	64,2	63	47,6
		3	9,201	130,3	119,6	81,8	72,9	81	75	61,2
		4	9,120	144,5	132,3	89,1	78,5	89,1	81,8	78,4
		5	9,082	146,5	142,3	91	79,8	91	86,1	86,9
		6	9,056	165,8	151,1	90,1	80,2	95	90,9	89,9
		7	9,028	174,4	159,4	90	80,4	99	95,4	89,3
		8	9,014	180,9	165,4	88,8	80,5	103,7	100,3	91
		9	8,994	190,1	173,1	89,5	82,4	107,5	104,1	94,5
		10	8,972	197	179,7	91,1	84,7	111,9	108,5	97,7
		11	8,956	202,2	183,7	94	87,2	114,9	111,5	99,8
		12	8,942	207,4	189	94,9	89,3	117,9	114,6	102,9
		13	8,928	201,9	191,2	96,4	90,8	121	117,3	105,3
		14	8,922	213,6	195,7	98	93,4	124,8	121,1	107,7
		15	8,908	215	196,2	99	94,5	127,2	123,4	109,8
		16	8,890	217,1	199	101,1	96,8	130,6	126,4	111,7
		17	8,876	217,4	199,3	101,9	97,9	133,3	128,7	113,4
		18	8,852	219,3	200,7	103,3	99,3	135,2	131,6	115,6
		19	8,830	221,4	202,5	105,2	101,1	137,4	132,5	116,9
		20	8,812	220,8	202,5	106,1	102,4	138,9	134,2	118
		21	8,800	221,8	203,5	107,8	104	140,4	135,1	118,8
		22	8,782	223	204,9	109	105,3	142,9	137,8	120,2
		23	8,762	222,6	204,2	110,1	106,4	144,3	138,9	121,1
		24	8,745	222,7	204,4	111,4	107,5	145,6	139,9	122,2
		25	8,725	223,7	205,8	112,8	109	145,4	139,9	122,9
		26	8,700	222,5	204,6	113,4	109,5	145,4	140,3	123,7
		27	8,684	222,5	204,3	113,9	110,3	145,5	140,3	124,7
		28	8,668	222,5	204,4	114,1	110,6	145,5	140,6	125
		29	8,641	222,5	204,4	114,1	110,6	145,5	140,6	125
		30	8,611	222,5	204,4	114,1	110,6	145,5	140,6	125

odrazivost matný E=0,95		TEPLOTA [°C]								
VZOREK	PŮVODNÍ VÁHA [kg]	CYKLUS [10min]	VÁHA [kg]	senzor 1 (předek)	senzor 2 (vršek)	senzor 3 (bok)	senzor 4 (zadek)			
Č.3	9,386	1	9,321	99,5	86,2	47,4	46,2	39,7	41,3	34,6
		2	9,250	119,2	107	69,2	67	58,8	60	45,3
		3	9,198	133	121,6	86,4	79,2	82	76,6	60,2
		4	9,122	144,2	132,1	93,4	84,7	88,8	82,7	77,6
		5	9,056	154	141,7	94,7	86,7	93,9	89,7	88,8
		6	8,990	162,7	149,6	95,6	88,7	99,6	95,5	91,4
		7	8,970	172,1	157,3	98	91,8	102,9	99,2	90,9
		8	8,944	178,4	163,3	100,8	95,1	106,1	102,6	88,8
		9	8,912	185,9	169,8	102,8	98	110,4	106,9	90,1
		10	8,900	192,5	175,7	105	100,5	114,1	110,5	93,4
		11	8,884	197,7	180,3	107,5	103,1	118	114,1	96,5
		12	8,866	203,5	185,2	109,6	105,4	121,1	117,3	99,6
		13	8,850	206,8	189,1	111,8	108	124,3	120,2	102,3
		14	8,844	208,5	192,2	113,9	109,8	126,9	122,6	105
		15	8,822	212,2	194,1	115,3	111,4	128,7	124,6	107,2
		16	8,806	214,1	196,3	117,9	114,2	131,3	126,9	108,8
		17	8,790	216,6	198,3	119,8	115,7	132,7	128,4	110,9
		18	8,784	218,7	200,2	120,6	116,8	136	131,2	113,3
		19	8,772	219,1	201,2	122,6	119	137,2	132,5	114,6
		20	8,748	221,1	202,1	124,2	120,4	138,6	133,3	115,8
		21	8,726	221,4	203,1	125,1	121,4	139,6	134,9	117
		22	8,712	221,5	203,3	126	122,3	139,6	134,7	117,4
		23	8,690	221,1	202,9	127,5	123,7	139,5	133,8	119,8
		24	8,678	221	202,7	128,5	124,6	139,4	134,1	121,7
		25	8,654	221,8	202,5	129	125,8	140,3	135	122,2
		26	8,636	221,8	203,9	131,4	127,3	139,5	134,5	123,4
		27	8,606	223,2	205,3	132,3	128,2	141	135,9	124,8
		28	8,596	223,2	205,3	132,3	128,4	141	136	124,8
		29	8,580	223,2	205,3	132,3	128,4	141	136	124,8
		30	8,572	223,2	205,3	132,3	128,4	141	136	124,8

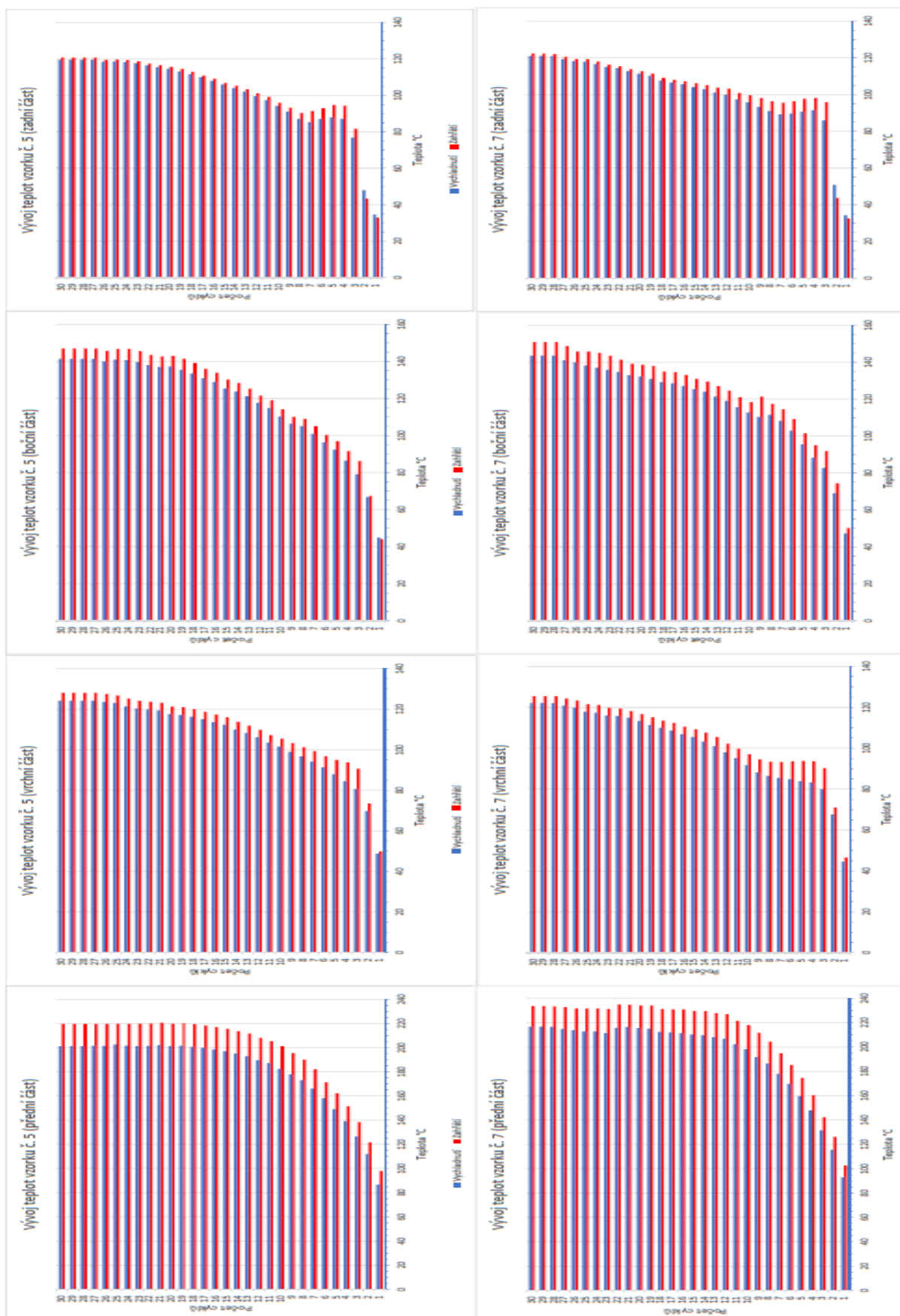
**Příloha č.4) Tabulka úbytku hmotnosti a vnitřních teplot při 8% vlhkosti,
vzorek č.1 a č.3**

VZOREK	PŮVODNÍ VAHA [kg]	CYKLUS [10min]	VAHA [kg]	VZOREK	PŮVODNÍ VAHA [kg]	CYKLUS [10min]	VAHA [kg]
Č.2	9,514	1	9,460	Č.4	9,552	1	9,502
		2	9,399			2	9,441
		3	9,320			3	9,397
		4	9,302			4	9,326
		5	9,284			5	9,280
		6	9,264			6	9,258
		7	9,244			7	9,234
		8	9,220			8	9,212
		9	9,198			9	9,190
		10	9,182			10	9,170
		11	9,164			11	9,150
		12	9,144			12	9,132
		13	9,128			13	9,114
		14	9,110			14	9,096
		15	9,078			15	9,082
		16	9,064			16	9,066
		17	9,050			17	9,050
		18	9,036			18	9,034
		19	9,010			19	9,022
		20	8,976			20	9,000
		21	8,964			21	8,978
		22	8,952			22	8,966
		23	8,942			23	8,946
		24	8,912			24	8,926
		25	8,893			25	8,916
		26	8,882			26	8,906
		27	8,862			27	8,886
		28	8,842			28	8,866
		29	8,812			29	8,856
		30	8,792			30	8,840
VZOREK	PŮVODNÍ VAHA [kg]	CYKLUS [10min]	VAHA [kg]	VZOREK	PŮVODNÍ VAHA [kg]	CYKLUS [10min]	VAHA [kg]
Č.6	9,594	1	9,543	Č.8	9,608	1	9,555
		2	9,496			2	9,506
		3	9,417			3	9,467
		4	9,344			4	9,414
		5	9,288			5	9,364
		6	9,212			6	9,314
		7	9,134			7	9,284
		8	9,112			8	9,272
		9	9,070			9	9,258
		10	9,050			10	9,228
		11	9,032			11	9,216
		12	9,014			12	9,202
		13	8,998			13	9,198
		14	8,984			14	9,176
		15	8,968			15	9,164
		16	8,954			16	9,158
		17	8,940			17	9,130
		18	8,926			18	9,104
		19	8,912			19	9,096
		20	8,898			20	9,080
		21	8,888			21	9,078
		22	8,878			22	9,072
		23	8,868			23	9,056
		24	8,858			24	9,048
		25	8,848			25	9,020
		26	8,836			26	9,000
		27	8,830			27	8,998
		28	8,824			28	8,990
		29	8,818			29	8,986
		30	8,810			30	8,982

**Příloha č.6) Tabulka úbytku hmotnosti při 8% vlhkosti, vzorek č.2, č.4, č.6
a č.8**



Příloha č.7) Graf vývoje vnitřních teplot vzorku č.1 a č.3



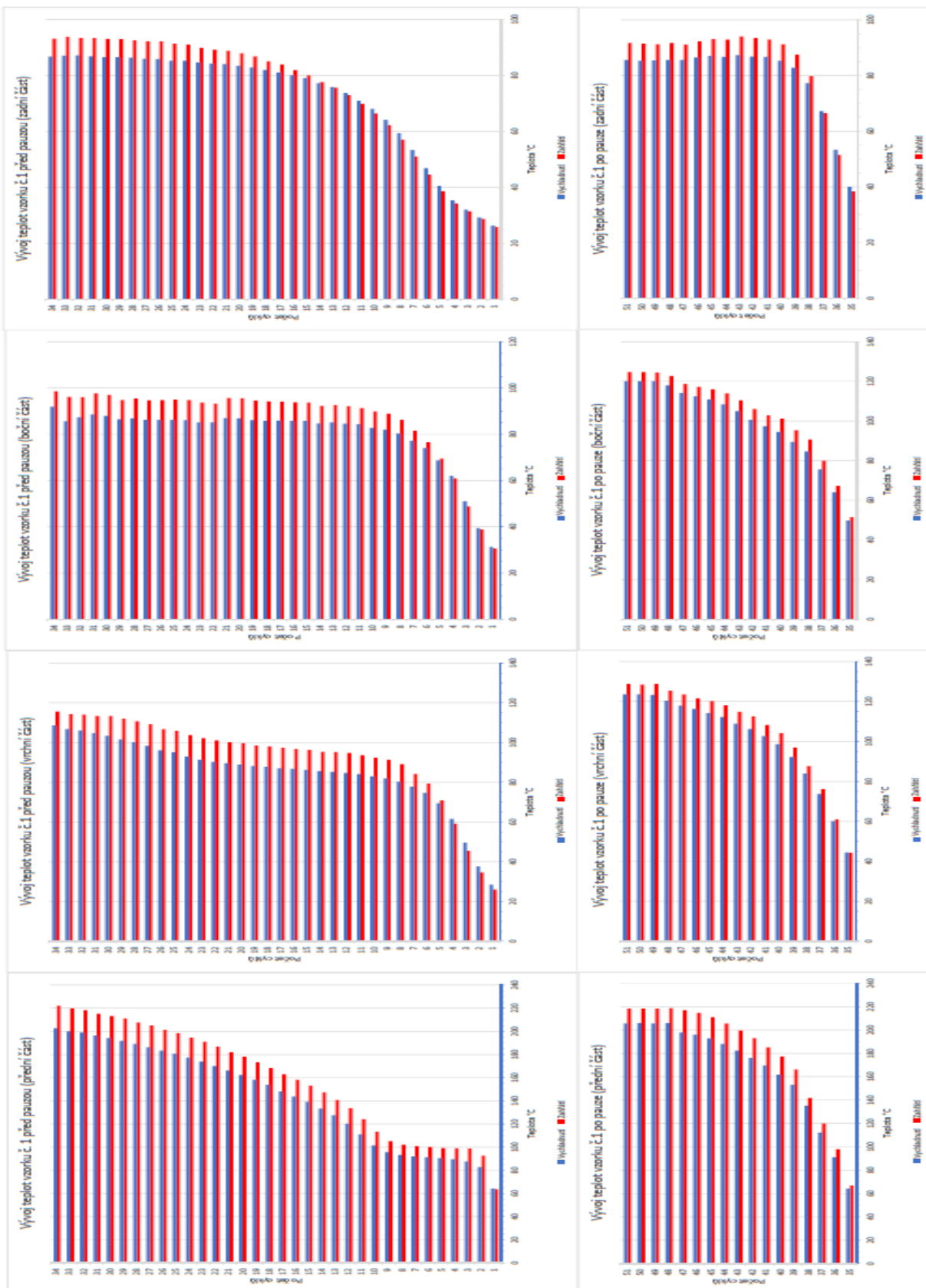
Příloha č.8) Graf vývoje vnitřních teplot vzorku č.5 a č.7

odrazivost		matny E=0,95		TEPLOTA [°C]							
VZOREK	PŮVODNÍ VAHA [kg]	CYKLUS [10min]	VAHA [kg]	senzor 1 (předek)	senzor 2 (vršek)	senzor 3 (bok)	senzor 4 (zadek)				
C.3	10,523	1	10,514	66,8	70	30,9	33,1	33,6	34,4	28,6	29,2
		2	10,490	97,4	85,7	43	47,4	44,1	45,4	32,6	33,1
		3	10,470	98,6	89,1	61,7	64,4	57,2	59,7	36,1	37
		4	10,438	99	90,4	81	75,5	71,9	71,3	41,4	44
		5	10,392	99,6	91,2	88,1	80,1	81,2	77,8	49,8	53,6
		6	10,342	100,7	91,9	91,3	82,4	87,2	81,5	59,1	62,7
		7	10,306	102,2	93,5	93,3	84	91,2	84,4	67,5	69,8
		8	10,250	105,5	95,9	94,7	85,2	93,7	86,1	73,7	74,5
		9	10,196	115,1	103,2	95,5	85,8	94,9	87,3	78,7	77,8
		10	10,152	129,3	116	96,1	86,4	95,7	88	82,6	80,4
		11	10,098	138,9	125,5	96,2	86,7	96,5	88,6	85,4	82,1
		12	10,042	146,6	132,5	96,6	87	96,6	88,8	87,6	83,5
		13	9,986	152,4	139,7	96,5	87,2	97,1	89,4	89,1	84,3
		14	9,934	158,9	145,1	96,7	87,3	96,3	90,4	90,8	85
		15	9,888	165,1	151	97,5	88,4	96,2	90,3	91,5	85,7
		16	9,822	170,7	155,9	98,5	89,8	96,6	90,6	92,4	86
		17	9,772	176,2	161,1	100,1	91,9	98,8	90,6	93	86,8
		18	9,724	180,6	165,5	101,1	93,6	99,5	91,9	93,8	87,3
		19	9,676	186,4	170,3	102	95,3	99,8	92,2	94	87,5
		20	9,614	190,3	173,7	102,9	96,7	100,2	92,4	94,5	87,7
		21	9,566	195	178,5	104,5	98,8	101,1	93,5	95,2	88,4
		22	9,512	199,1	182,6	106	100,6	101,5	94,1	95,4	88,7
		23	9,458	203,1	186	107,9	102,5	101,1	94,2	95,5	88,7
		24	9,408	206,5	189,1	109,4	104,4	102,3	96	95,6	88,9
		25	9,358	210	192,1	111,1	106,3	105,8	99,4	96,2	89,1
		26	9,318	212	194,6	112,7	108	111	104,9	96,2	89,3
		27	9,276	214,7	196,4	114,3	109,7	114,9	108,6	96,3	89,2
		28	9,212	216,3	198	116	111,3	118,6	112,3	96,3	89,1
		29	9,164	217,3	199,8	117,7	113,3	121,3	115,2	95,6	88,9
		30	9,126	218,1	200,2	119	114,3	126,4	120,1	96,4	89,2
		31	9,078	219,2	201,4	120,7	116,2	130	123,7	95,8	89
		32	9,026	222	203,4	122,6	117,7	132,5	125,9	96,2	89,2
		33	8,988	223,4	204,9	125	120,1	135,2	128,8	95,7	89
		34	8,946	224,9	206,1	127,4	122,2	136,5	130,4	95,3	88,8
8,786	Pauza										
	35	8,776	68,2	64,4	42,2	41,5	52	50,4	46,8	43,9	
	36	8,770	95,6	87,2	54	53,8	68,8	66,3	60,2	57,1	
	37	8,764	115,6	106,4	66,3	66,2	81,7	78,9	71,8	68,3	
	38	8,744	131	122,1	78,1	77,9	94,2	90,8	80,4	75,9	
	39	8,718	149,7	141	87,2	86,4	102,6	99	86,9	81,7	
	40	8,692	172,4	158,8	94,6	93,2	110	105,9	91,3	85,2	
	41	8,672	183,8	167,5	100,6	98,5	114,8	110,6	92,1	86,3	
	42	8,642	191,3	174,5	105,2	102,7	120,4	116	93	87	
	43	8,616	195,6	179,1	109	106,6	125	120,5	92,5	87	
	44	8,606	202,3	184,1	112,2	109,6	128,6	123,8	93	87,5	
	45	8,590	206,3	188,9	115,3	112,9	131,6	126,9	92,7	87,8	
	46	8,586	210,4	192,5	117,7	115,3	134,9	130,1	93,2	88,7	
	47	8,575	210,2	192,5	117,5	115,7	134,9	130,9	93,4	88,8	
	48	8,570	210,2	192,7	117,4	115,6	134,8	130,8	93,3	88,8	
odrazivost		matny E=0,95		TEPLOTA [°C]							
VZOREK	PŮVODNÍ VAHA [kg]	CYKLUS [10min]	VAHA [kg]	senzor 1 (přímě)	senzor 2 (vrch)	senzor 3 (bok)	senzor 4 (zadek)				
C.1	11,232	1	11,204	63,7	64,2	26,1	28,4	30,6	31,3	25,8	26,3
		2	11,200	92,7	82,7	34,7	37,6	38,8	39,4	28,7	29,2
		3	11,166	98,7	87,5	45,5	49,6	48,9	51	31,4	32
		4	11,138	99,1	89,4	59,2	61,5	60,9	62,1	34,2	35,3
		5	11,092	99,2	90,5	70,8	69,4	69,5	68,7	38,6	40,5
		6	11,050	100,1	91,2	79,3	74,7	76,6	74	44,5	46,8
		7	11,022	100,9	92	84,2	77,8	81,5	77,2	51	53,3
		8	10,976	102,2	93,1	89,1	80,3	86,2	80,3	57	59,3
		9	10,936	105,2	95,5	91,2	82	88,9	82	62,2	64,1
		10	10,872	113,3	101,4	92,4	82,9	89,8	82,7	66,4	68
		11	10,828	124	111,1	93,7	84,1	91,3	84,3	69,8	70,9
		12	10,782	133,6	120,1	94,8	84,6	92,1	84,6	72,9	73,7
		13	10,724	140,8	127,5	95,2	85,2	92,7	85,1	75,6	75,8
		14	10,708	147,3	133,4	95,3	85,6	92,3	84,7	77,6	77,2
		15	10,632	153,1	139,1	96,2	86,2	93,8	85,8	80	79
		16	10,604	158,1	143,7	96,8	86,7	93,9	85,8	81,9	80
		17	10,558	163	148	97,3	87	94,1	85,9	83,9	81
		18	10,500	168,4	153,8	98	87,8	94,2	85,7	85	81,9
		19	10,454	173,2	158,1	98,5	88,2	94,6	86,1	86,8	82,8
		20	10,400	178	162,5	99,5	88,9	95,6	86,8	87,9	83,4
		21	10,350	181,9	166,2	100,1	89,6	95,7	87	88,5	84
		22	10,288	186,8	170,1	101,1	90,3	93,3	85,1	89,2	84,2
		23	10,240	191	173,8	102,2	91,3	93,8	85,2	89,8	84,6
		24	10,194	194,5	177,3	103,8	93	94,8	86,1	91	85,2
		25	10,072	198,3	180,7	105,7	95	95	86,2	91,3	85,2
		26	9,996	201,3	183,3	106,7	96	94,8	86,2	92,1	85,8
		27	9,922	205	186,3	109,1	98,3	94,7	86,3	92,1	85,9
		28	9,878	207,8	189,1	110,7	100,2	95,5	86,9	92,5	86,3
		29	9,774	211,2	191,8	111,9	101,5	94,8	86,5	92,9	86,5
		30	9,726	213,2	194,3	113,3	103,4	97	87,9	93	86,5
		31	9,666	215,2	196,4	113,4	104,7	97,7	88,5	93,3	86,8
		32	9,616	218,3	199,1	114,1	106	96,1	87,3	93,3	87,1
		33	9,575	219,8	200	114,2	106,7	96,2	85,6	93,8	87
		34	9,495	222,2	202,6	115,6	108,6	98,6	91,9	93,1	86,7
9,14	Pauza										
	35	9,126	66,7	64,2	44,3	44,4	51,5	49,8	38,3	40	
	36	9,08	97,9	90,9	60,9	60,1	67,3	64	51,5	53,3	
	37	8,984	120,1	112,1	76	73,7	80	75,6	66,5	67,2	
	38	8,953	141,9	135,2	87,7	83,9	90,8	84,6	79,8	77,3	
	39	8,92	166,2	153	96,9	92,2	95,4	89,5	87,5	82,8	
	40	8,908	177,2	161,8	104,1	98,6	101,2	94,5	91,3	85,3	
	41	8,888	185,2	169,6	108,3	102,7	102,9	97,4	93	86,7	
	42	8,858	193,1	176	112,4	106,2	106,2	100,6	93,4	86,8	
	43	8,842	199,7	182,4	114,8	108,9	110,5	105	94,1	87,3	
	44	8,814	205,5	188,1	118,1	112,2	114	108,4	92,9	86,7	
	45	8,772	211	192,8	120,2	114,2	116	110,9	93,1	87	
	46	8,752	214,6	196	121,6	116,2	117,5	112,5	92,3	86,5	
	47	8,698	217,1	198	123,6	118	118,7	114,1	91,1	85,6	
	48	8,668	218,8	205,9	125,4	120,3	122,7	118	91,7	85,6	
	49	8,656	218,2	205,6	128,7	123,3	124,5	120,1	91,3	85,4	
	50	8,618	218,4	205,7	128,5	123,6	124,7	120,1	91,4	85,3	
51	8,609	218,3	205,6	128,7	123,6	124,7	120,1	91,8	85,6		

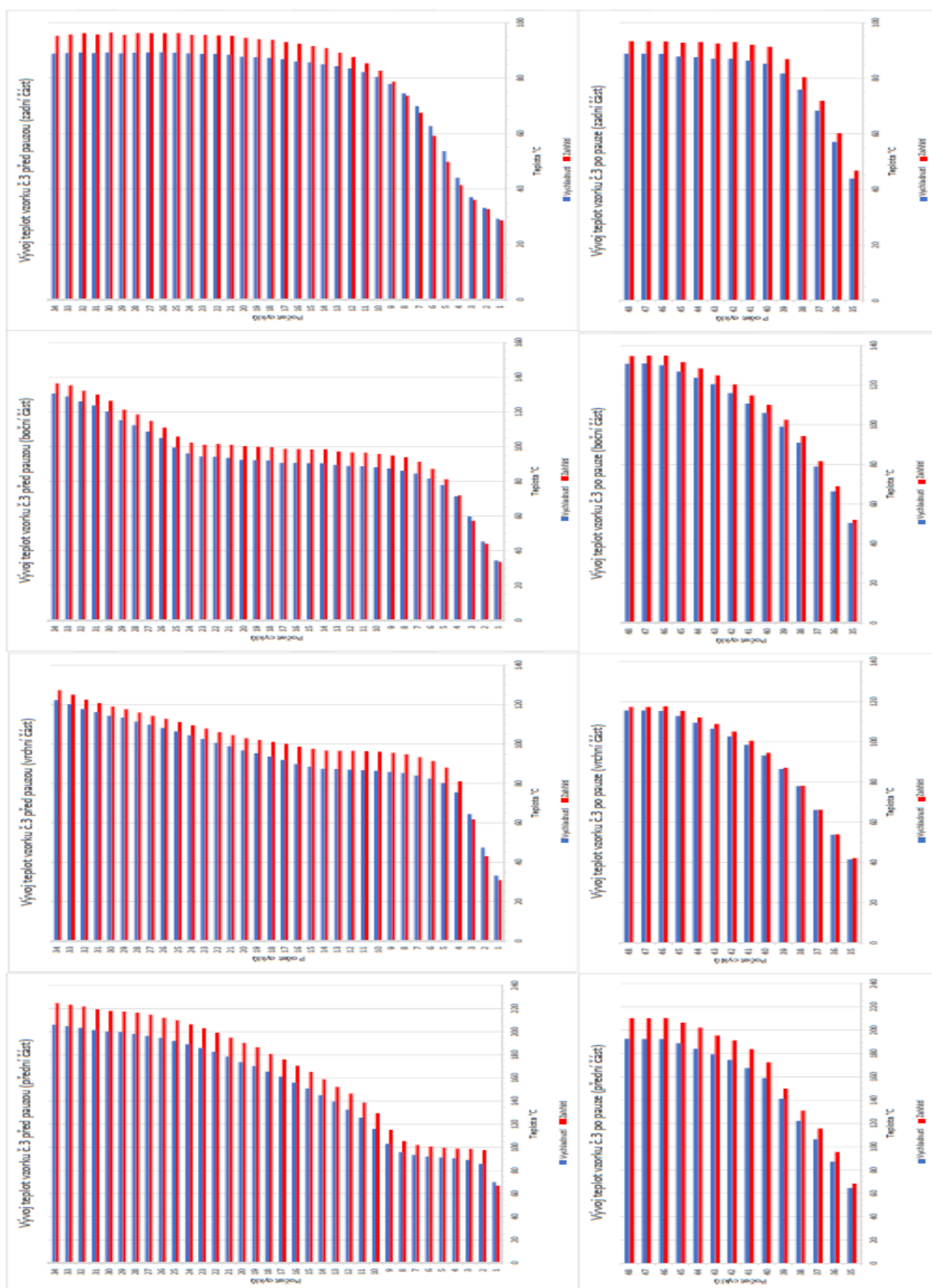
Příloha č.9) Tabulka úbytku hmotnosti a vnitřních teplot při 8% vlhkosti,
vzorek č.1 a č.3

odrazivost matný E=0,95		TEPLOTA [°C]							
VZOREK	PŮVODNÍ VÁHA [kg]	CYKLUS [10min]	VÁHA [kg]	senzor 1 (předek)	senzor 2 (vršek)	senzor 3 (bok)	senzor 4 (zadek)		
Č.5	11,610	1	11,604	72,3	72,7	29,3	32,1	34,3	35,8
		2	11,582	98,5	87,6	40,1	45,6	47,7	51,2
		3	11,562	98,5	90,2	58,9	63,1	70,7	68,8
		4	11,518	99,1	91,3	75,5	74,2	84,5	77,3
		5	11,480	99,5	92,3	84,1	79,2	90,7	81,9
		6	11,446	101	93,5	88,8	82,2	93,2	84,1
		7	11,390	102,5	94,8	91,9	83,8	94,9	85,6
		8	11,338	106	98,3	94	85,2	96	86,9
		9	11,292	116,8	107,6	94,8	85,7	96,4	87,8
		10	11,240	130,5	120	95,7	86	96,4	87,8
		11	11,194	136,4	120,4	96	86	97,3	88,6
		12	11,144	147,3	134,7	96,7	86,3	97,7	89
		13	11,094	153,5	140,1	97	86,3	98,6	90
		14	11,036	159,7	145,9	97,5	86,8	98,2	90
		15	10,990	165,1	150,7	98,3	87,6	97,8	89,8
		16	10,938	169,7	154,8	99,3	88,4	98,5	90,1
		17	10,886	174,2	158,6	100,3	89,6	98,4	90,2
		18	10,826	178,5	162,8	101,4	91,1	98,8	90,7
		19	10,772	182,2	166	102,4	92,8	99,1	91,1
		20	10,722	185,9	169	102,9	94,2	99,2	91,2
		21	10,672	187,4	171	103	95	100,7	92,5
		22	10,618	193,7	176,1	104,4	96,8	101,3	93,1
		23	10,568	197,9	180,3	104,8	98,3	101,7	94,2
		24	10,514	201,7	183,3	104,8	99	103,1	95,8
		25	10,460	204	186	105,7	100,4	106,9	100
		26	10,412	207,6	189	106,5	101,9	109,4	102,5
		27	10,362	208,1	189,5	107,2	102,6	116,5	108,7
		28	10,302	210,7	192,2	108,8	104,2	120	112,5
		29	10,258	212	193,8	110,1	105,6	123,8	116,4
		30	10,202	214	195,5	111,8	107	125,7	118,5
		31	10,154	215,1	196,9	114	109,2	128,2	121,1
		32	10,083	217,5	199,1	115	110,4	128,9	122,2
		33	9,980	218,4	199,7	117	112,1	128,8	122,5
		34	9,900	218,7	199,7	118,6	113,8	132,1	125,4
		Pauza							
		35	9,594	67,1	62,5	39,9	39,6	52,4	49,9
		36	9,546	92,5	85,1	52,3	52,5	66,8	64,4
		37	9,489	111,2	102,3	64,8	64,6	78,7	75,7
		38	9,438	126,5	117,8	75,9	75,2	92,7	88,6
		39	9,394	143,5	135,2	85	83,7	101,5	97,3
		40	9,354	165,8	153,1	91,9	90,1	108,8	104
		41	9,312	175	160,9	97,7	95,3	115,3	110,5
		42	9,288	182,4	167	102	99,4	119,5	114,3
		43	9,244	188	172	105,4	102,5	123,7	118,3
		44	9,206	194,4	177,8	107,8	105,1	122,7	117,8
		45	9,167	197,3	178,9	110,1	107,1	121,4	116,5
		46	9,1	201,2	184	112,4	109,7	122,4	118,2
		47	9,054	203,8	186,5	114,8	112,1	123,3	119,4
		48	8,989	205,8	188,1	117,1	113,9	124,5	120,3
		49	8,924	210,1	191,9	118,2	115,3	125,1	121,4
		50	8,898	213,1	194,6	119,6	116,4	127	122,6
		51	8,866	214,2	195,8	120,6	117,5	127,6	123,4
		52	8,813	216	198,1	121,8	118,9	130,6	126,4
		53	8,789	218,2	201	122,7	119,7	130,4	126
		54	8,744	220,6	202,5	123,5	120,6	130,2	126
		55	8,734	220,3	202,2	123,6	120,6	130,4	126,2
		56	8,724	220,7	202,6	123,5	120,6	130,6	126,5
Č.7	10,350	1	10,340	67,3	69,8	27,7	30,9	28,8	30,1
		2	10,328	98,5	87,1	38,7	43,8	36,8	39
		3	10,310	99,1	90,1	55,7	60,6	48,6	52
		4	10,278	99,3	91,3	72,2	72,9	60,3	62,1
		5	10,228	99,9	92	83,3	79,8	71,7	70,9
		6	10,182	101,3	92,7	89,6	83,6	79,6	76,4
		7	10,128	102,5	94,7	92,8	85,9	85,8	80,3
		8	10,104	107,7	98,1	95,2	87,8	89	85
		9	10,054	119,3	107,5	96,3	88,8	90,4	84
		10	10,008	131	117,7	96,6	89,5	90,5	84,3
		11	9,952	142,1	126,8	97,6	90	91,9	84,8
		12	9,910	158	132,7	97,6	90	93,2	85,7
		13	9,842	157,2	139	98	90,3	93,5	86
		14	9,796	162,1	144	96,6	89,6	91,8	85
		15	9,752	163	148,6	98,1	90,1	94,2	86,5
		16	9,686	171,2	151,5	98,5	90,5	96,3	88
		17	9,636	174	154,2	99,1	90,8	95,9	87,7
		18	9,596	176,2	157,2	99,4	91,2	95,1	87,3
		19	9,528	177,5	158,8	99,6	91,7	96,8	88,3
		20	9,484	179,3	159,4	99,7	91,5	96	87,9
		21	9,434	181,3	160,7	100	92,7	96,1	88
		22	9,378	184	162,4	101,2	93,9	96,3	88
		23	9,324	184,5	164,7	103	96	96,2	88,2
		24	9,286	184,8	177,1	102,9	97	95,9	88,2
		25	9,246	198,2	179,1	104,5	98,7	94,8	87,5
		26	9,188	200	178,5	105,7	100,1	94,7	87,3
		27	9,140	200,8	186,8	107,4	102,1	95,1	87,2
		28	9,130	208	186,5	108,6	103,3	97,7	89,3
		29	9,115	208,2	186,5	110,1	105,4	95,3	88,5
		30	9,082	209,2	188,1	112,4	107,2	94,5	87,8
		31	9,052	218,8	206,9	114	109	96	89,5
		32	9,028	222,2	207,9	114,7	109,7	98	91
		33	9,008	227,4	207,6	117,6	112,4	98,9	90,8
		34	8,985	226,7	207,9	117,4	109,6	100	93,5
		Pauza							
		35	8,836	68,7	65,6	41	40,7	46,8	44,4
		36	8,830	99,2	91,4	53,6	53,3	59	56,3
		37	8,816	116,9	111,1	66	65,5	68	65,1
		38	8,796	139,5	129,6	76,5	75,9	77,3	73,7
		39	8,772	161,3	151,8	85,6	84,5	86,1	81,6
		40	8,756	178,7	163,8	92,9	91,4	94	88,3
		41	8,731	187,5	170,6	98,4	96,6	99,4	93,1
		42	8,706	193	175,4	102,8	100,5	99,4	93,5
		43	8,686	194	176,5	107	105	103,1	97,5
		44	8,675	204	188,6	112,8	110	103,1	98,7
		45	8,669	206,3	188,6	112,6	110,1	103,1	98,8
		46	8,662	206,1	188,3	112,6	110,1	103	98,7

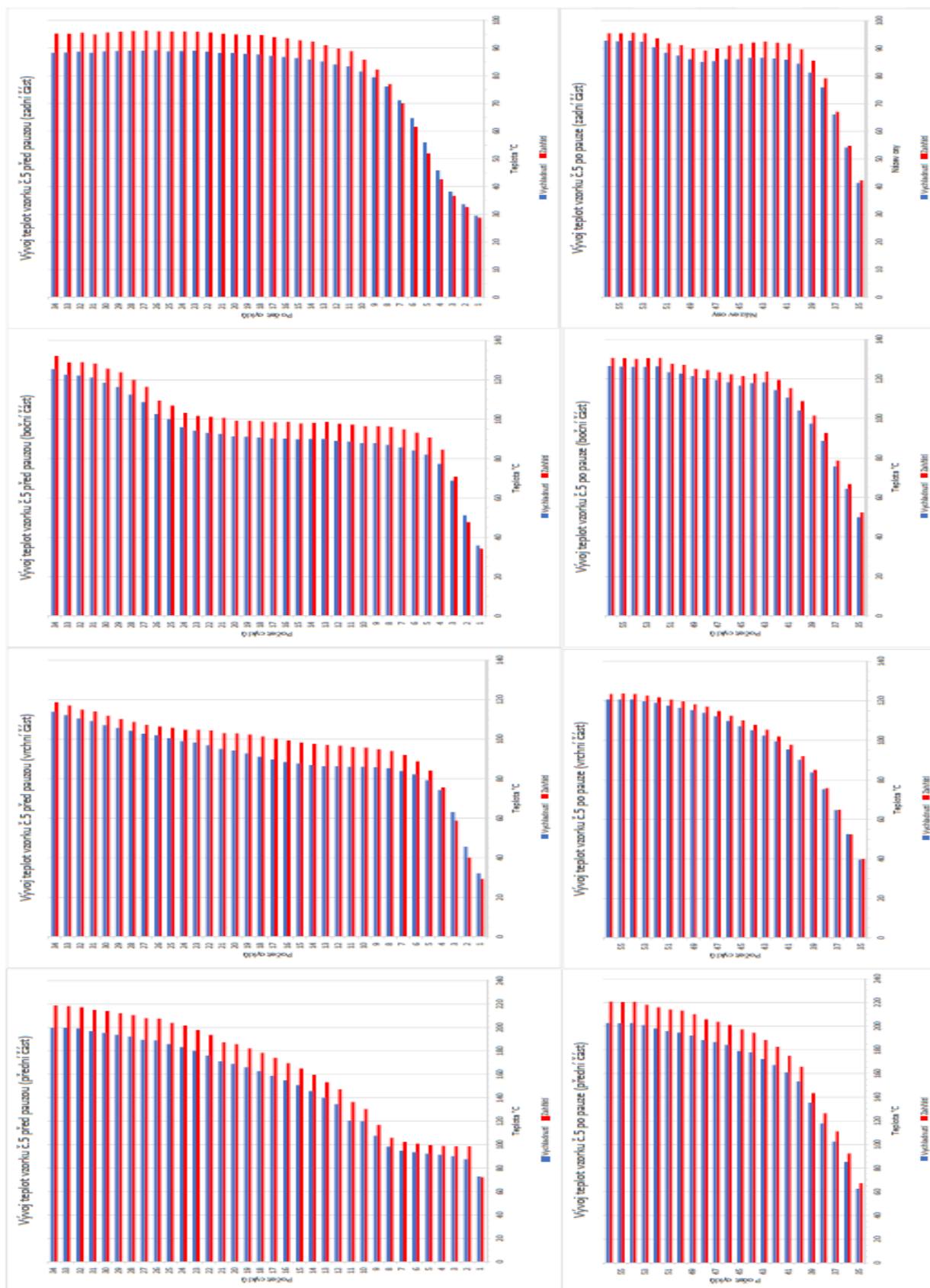
Příloha č.10) Tabulka úbytku hmotnosti a vnitřních teplot při 8% vlhkosti, vzorek č.5 a č.7



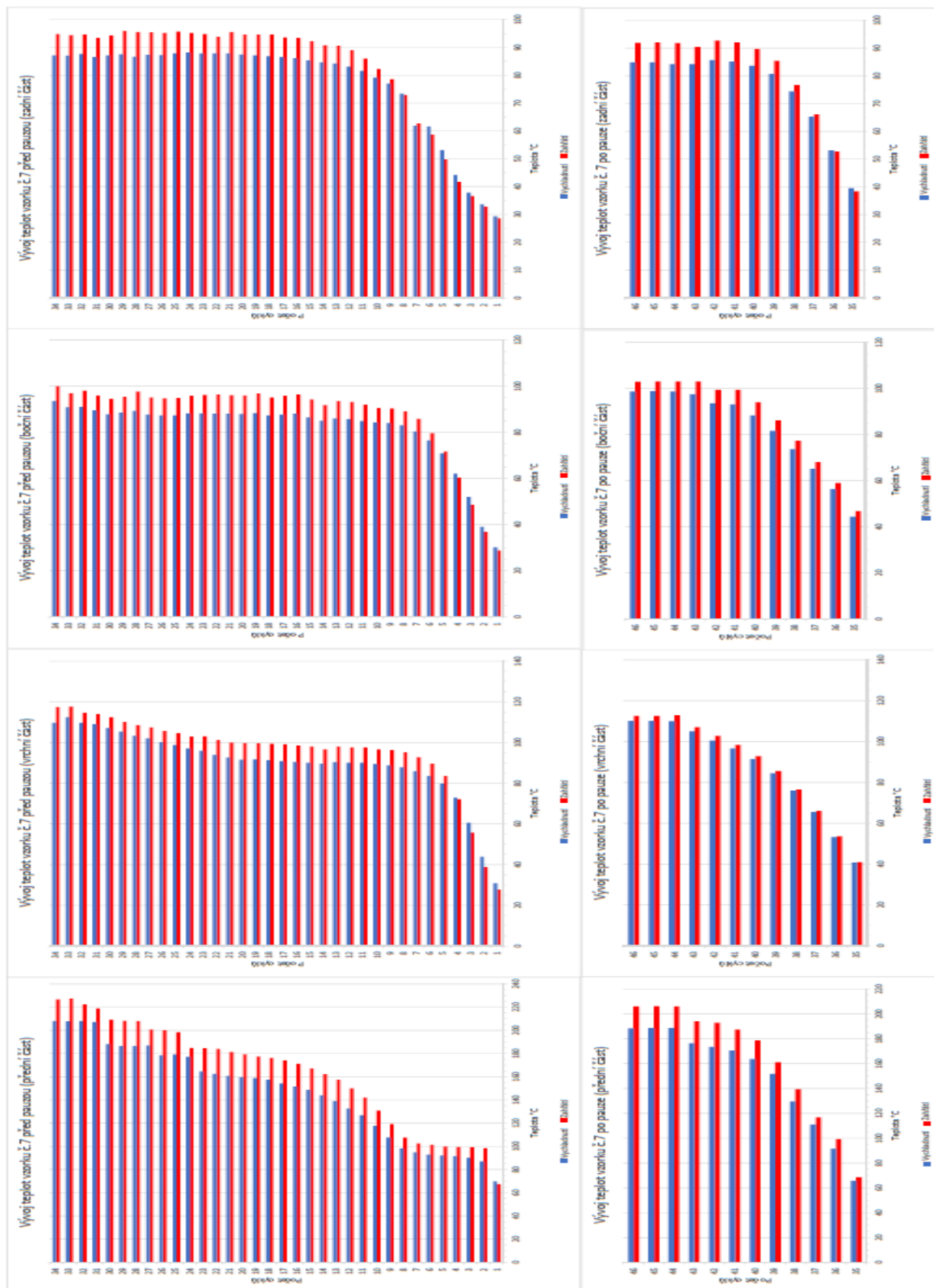
Příloha č.11) Graf vývoje vnitřních teplot vzorku č.1



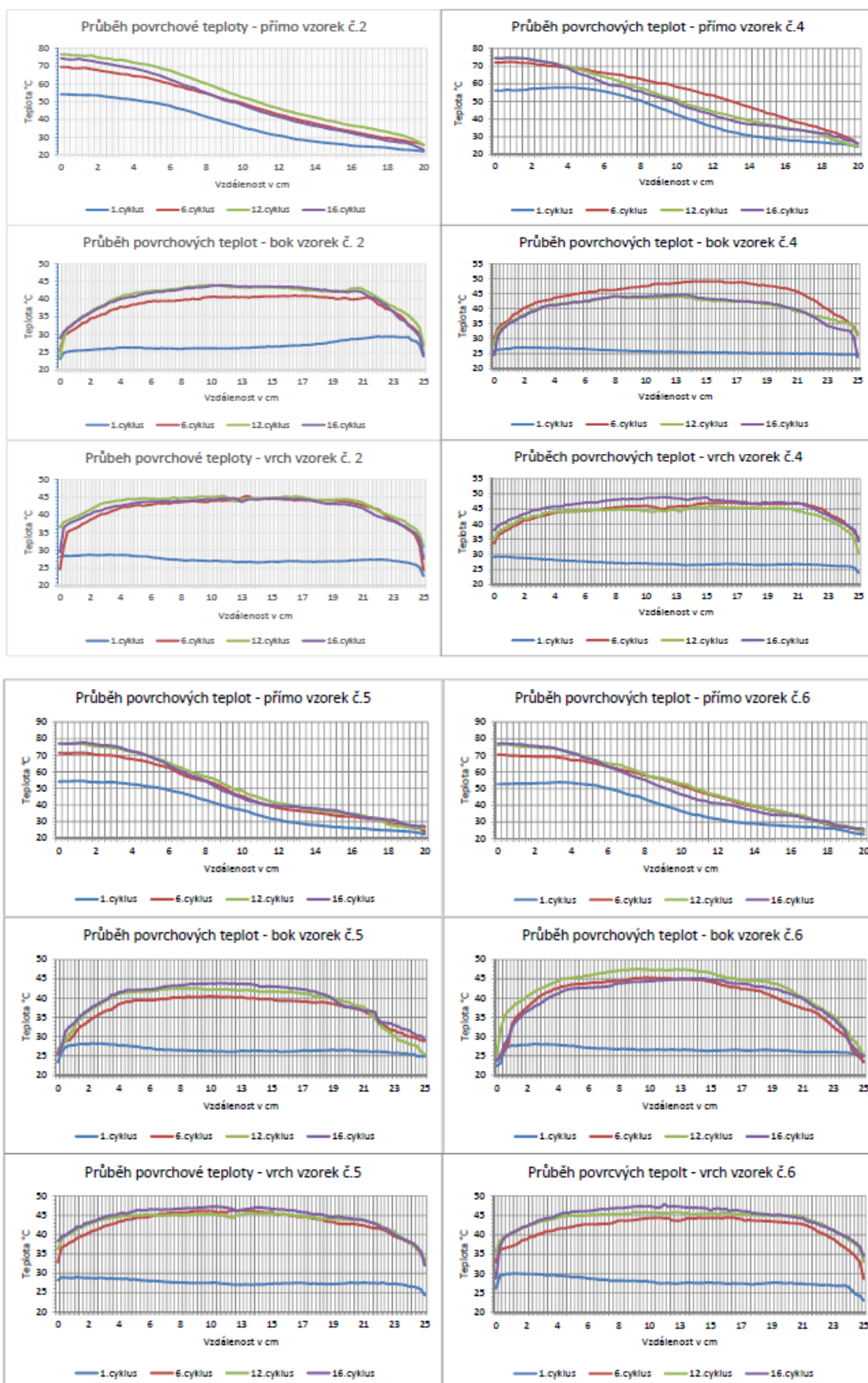
Příloha č.12) Graf vývoje vnitřních teplot vzorku č.3



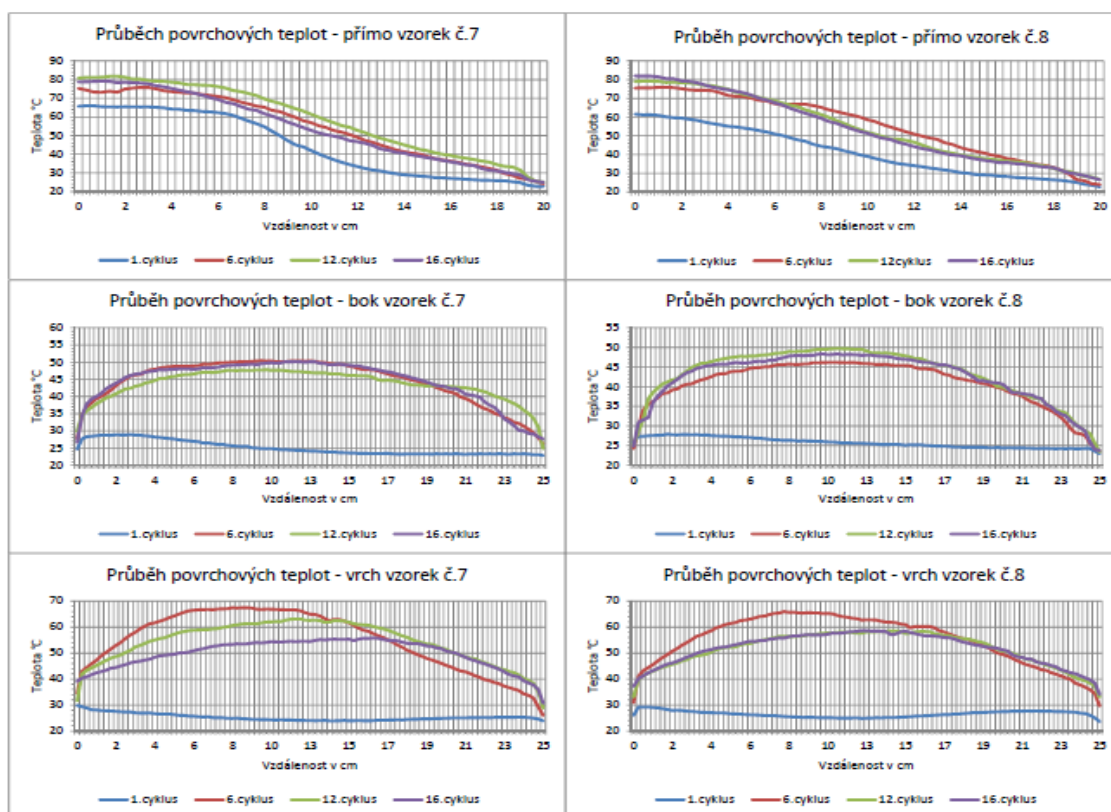
Příloha č.13) Graf vývoje vnitřních teplot vzorku č.5



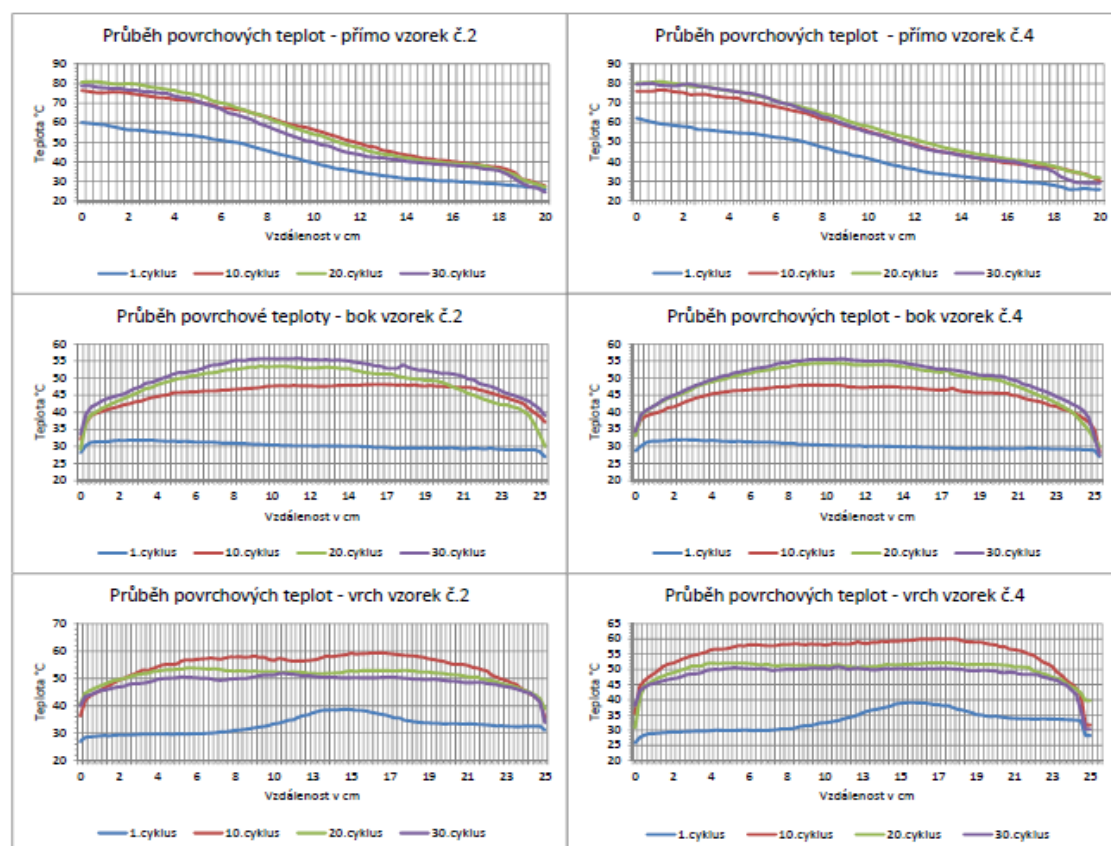
Příloha č.14) Graf vývoje vnitřních teplot vzorku č.7



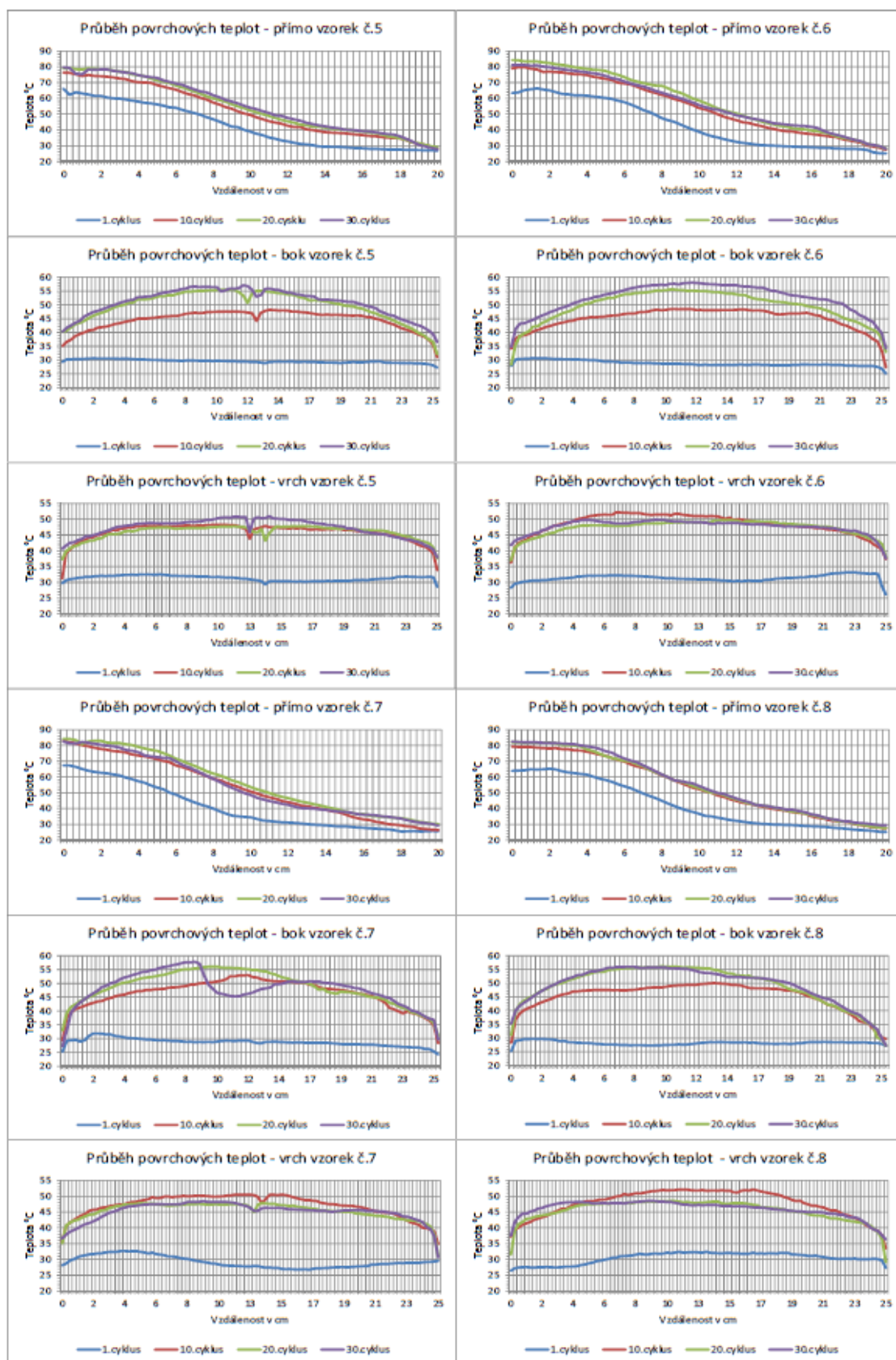
Příloha č.15) Grafy průběhu povrchových teplot při 3% vlhkosti



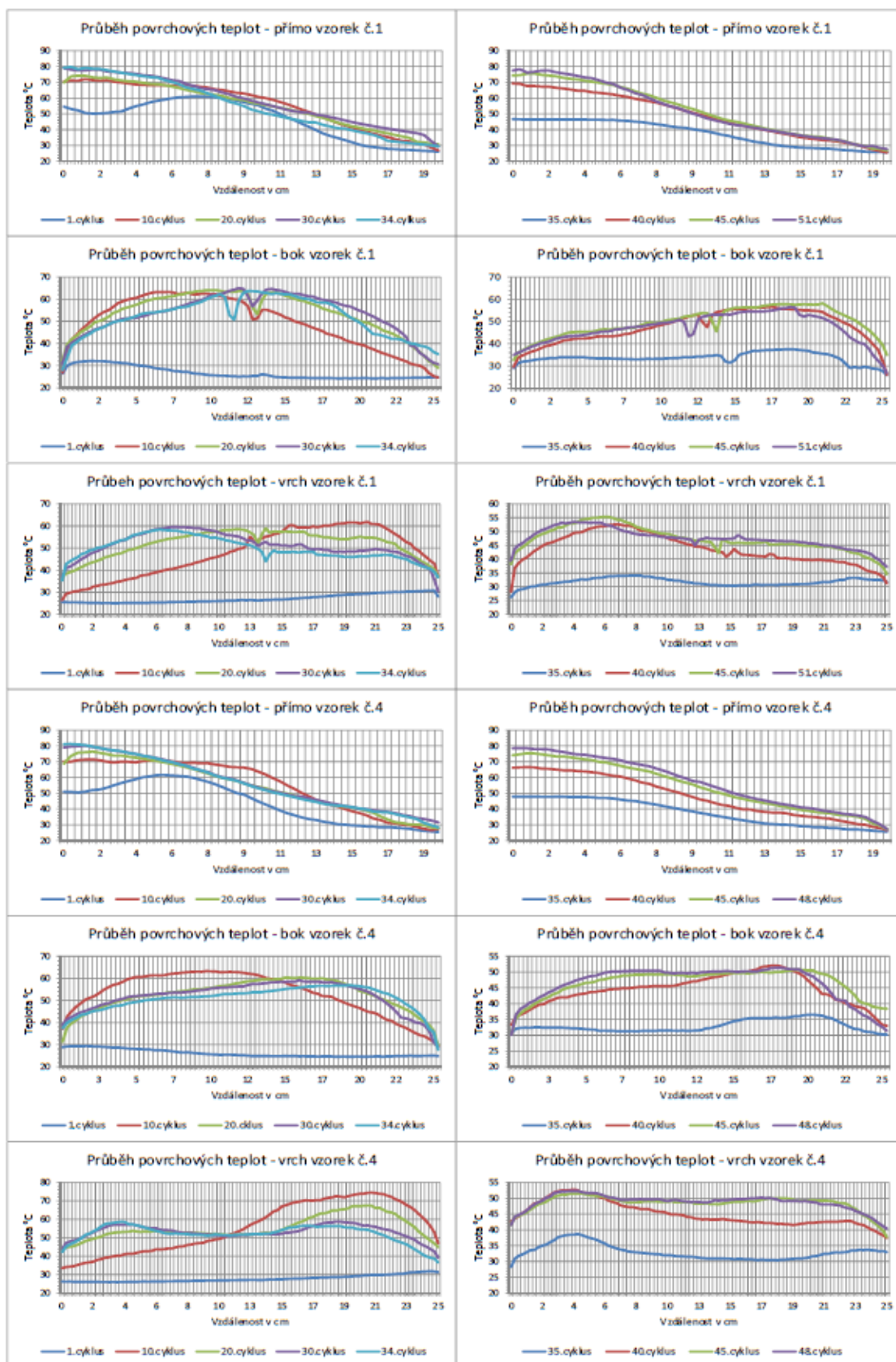
Příloha č.16) Grafy průběhu povrchových teplot při 3% vlhkosti



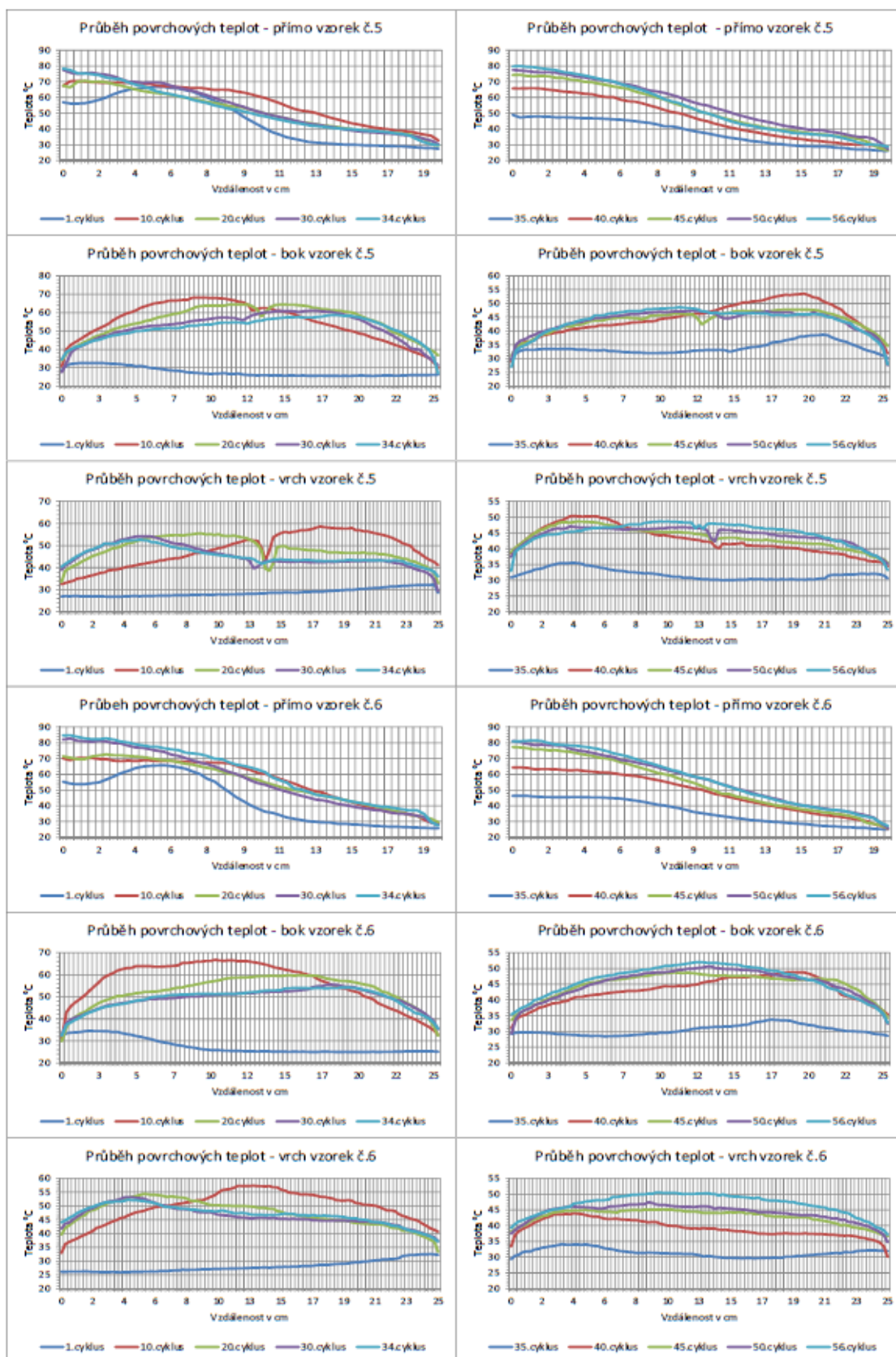
Příloha č.17) Grafy průběhu povrchových teplot při 8% vlhkosti



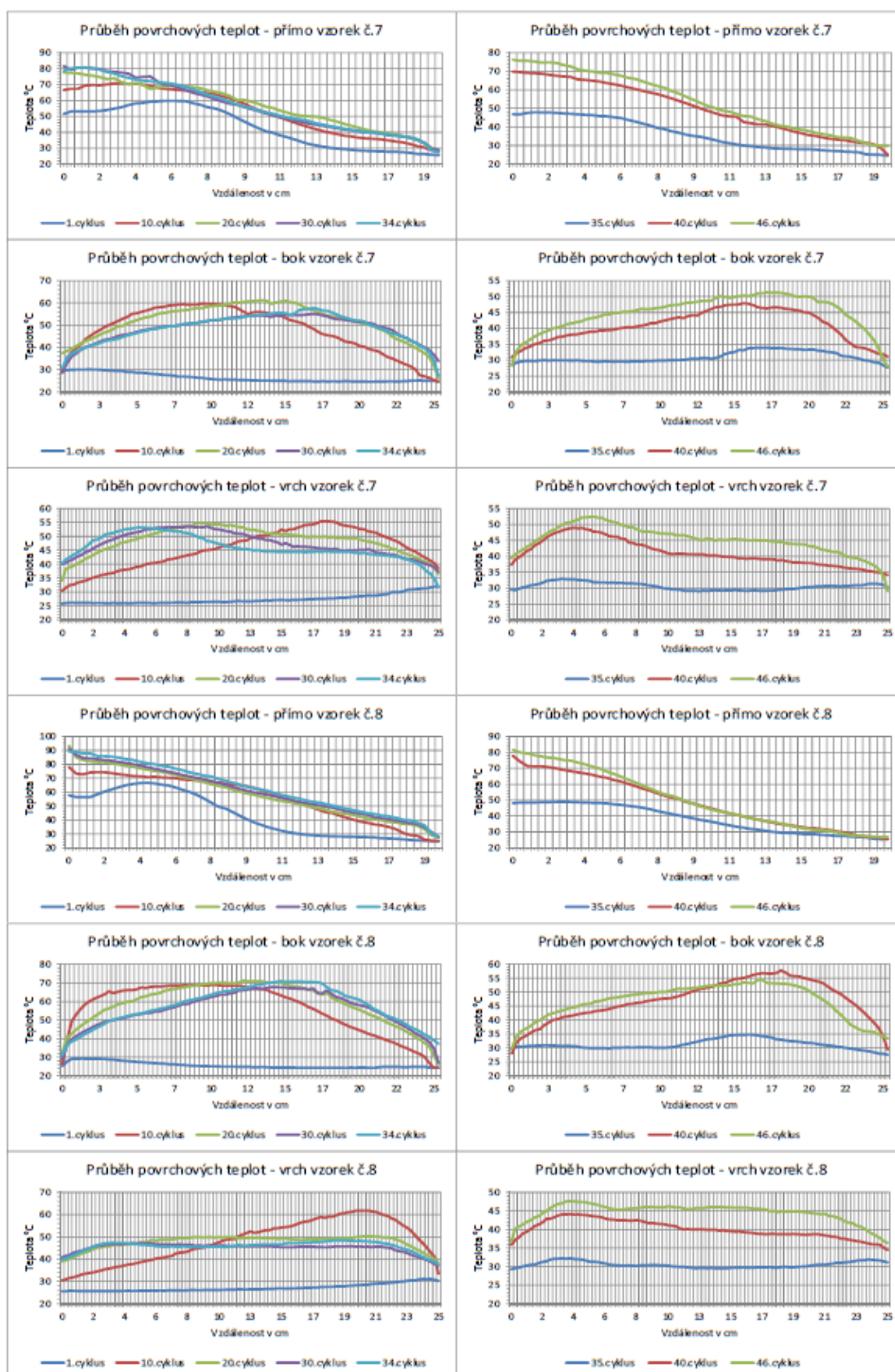
Příloha č.18) Grafy průběhu povrchových teplot při 8% vlhkosti



Příloha č.19) Grafy průběhu povrchových teplot při 24% vlhkosti



Příloha č.20) Grafy průběhu povrchových teplot při 24% vlhkosti



Příloha č.21) Grafy průběhu povrchových teplot při 24% vlhkosti