



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

# ANALÝZA PŮSOBENÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA STAVEBNÍ HMOTY

ANALYSIS OF EMW RADIATION ON CONSTRUCTION SUBSTANCES

## DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Ing. David Průša

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL ŠUHAJDA, Ph.D.

BRNO 2023

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem ANALÝZA PŮSOBENÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA STAVEBNÍ HMOTY zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 12. 2023

---

Ing. et Ing. Ing. David Průša  
autor práce

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. David Průša *ANALÝZA PŮSOBENÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA STAVEBNÍ HMOTY*. Brno, 2023, 123 stran. 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 disertační práce s názvem ANALÝZA PŮSOBENÍ  
MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ NA STAVEBNÍ HMOTY je shodná s odevzdanou listinnou formou.  
V Brně dne 11. 12. 2023

---

Ing. et Ing. Ing. David Průša  
autor práce

## Poděkování

Rád bych poděkoval zejména svým dvěma kolegům, školitelům, rádcům a akademickým vzorům za pomoc a vedení během mého doktorského studia – panu prof. Stanislavu Šťastníkovvi a panu doc. Karlu Šuhajdovi. Obou si velice vážím a přál bych všem studentům mít takové vedení, jaké jsem měl já.

Další velké díky patří Bohu, mé rodině, zejména babičce, dále mé partnerce Anetě za trpělivost a Kateřině za pomoc kdykoli bylo potřeba. Poslední důležitý kolega, kterého si dovoluji zmínit je Tomáš Žajdlík, bez kterého by řada našich publikací nevyšla a vždy byl důležitou součástí týmu.

Děkuji, kolegové.

A sobě. Děkuji zejména a hlavně sobě, protože je potřeba obrovská vůle, tvrdohlavost a síla studovat doktorský program a zvládnout ho tak dobře, jak jsem to zvládnul právě já.

V Brně dne 13. 10. 2023

---

Ing. et Ing. Ing. David Průša  
autor práce

## POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.
<b>Autor práce</b>	Ing. et Ing. Ing. David Průša
<b>Škola</b>	Vysoké učení technické v Brně
<b>Fakulta</b>	Stavební
<b>Ústav</b>	Ústav pozemního stavitelství
<b>Studijní obor</b>	3608V001 Pozemní stavby
<b>Studijní program</b>	P3607 Stavební inženýrství
<b>Název práce</b>	Analýza působení mikrovlnného záření na stavební hmoty
<b>Název práce v anglickém jazyce</b>	Analysis of EMW radiation on construction substances
<b>Typ práce</b>	Disertační práce
<b>Přidělovaný titul</b>	Ph.D.
<b>Jazyk práce</b>	Čeština
<b>Datový formát elektronické verze</b>	PDF

**Abstrakt práce** Mikrovlnné záření je ve stavební praxi hojně využíváno zejména k vysoušení stavebních materiálů, sanaci vlhkého zdiva nebo sterilizaci biotických škůdců, kteří napadli stavební konstrukce. Další, ovšem méně časté, využití může být například při urychlování tuhnutí hmot a dílců, kdy vlivem působení mikrovlnného záření dojde ke snížení potřebné doby pro získání manipulační pevnosti. Dostupná vědecká a technická literatura uvádí, že některé materiály, například cihelné střeby, vystavené mikrovlnnému záření při sanaci vlhkosti nemění své fyzikální a mechanické vlastnosti, ačkoli to dosud nebylo dostatečně ověřeno, a naopak, že dochází ke značné změně vlastností, pokud se mikrovlnné záření využívá k urychlení tuhnutí čerstvých směsí, například těch, které obsahují cementovou pojivovou matici.

Předložená práce navazuje na mnohaletý výzkum v této oblasti, doplňuje a zpřesňuje stávající informace, poskytuje nové poznatky o mechanických a fyzikálních vlastnostech běžně dostupných stavebních materiálů, které byly vystaveny řízenému mikrovlnnému záření, a porovnává je s referenčními hodnotami. Zároveň práce umožňuje navázat na tento výzkum dalšími experimenty.

Experimentální výzkum proběhl na dvou separátních sadách vzorků. První experiment proběhl na souboru vzorků hliněných cihel, byl prováděn pomocí zkoušek podle evropských norem a zaměřoval se na vliv mikrovlnného záření na pevnost v tlaku a nasákavost. Experimentální vzorky byly vystaveny vlhkosti a poté byly exponovány mikrovlnnému záření za účelem odvlhčení a následně byly porovnány s referenčními vzorky. Údaje z těchto experimentů naznačují, že mikrovlnné záření lze

využít pro sanaci cihelných střepeů a nedojde ke značné změně výsledných mechanických vlastností vůči počátečnímu stavu. Druhý experiment se uskutečnil na souboru betonových směsí, kde proběhlo urychlení tuhnutí za pomoci mikrovlnného záření, a zjištěné výsledky mechanických a fyzikálních vlastností se porovnály s vlastnostmi referenčních vzorků. Údaje z tohoto experimentu naznačují, že mikrovlnné záření lze použít k urychlení vytvrzení betonových vzorků, čímž se získá manipulační pevnost v relativně krátkém čase, ale lze očekávat snížení výsledné pevnosti ve srovnání s referenčními vzorky.

**Abstrakt práce  
v anglickém jazyce**

In construction practice, microwave radiation is widely used for drying building materials, remediating damp masonry or sterilizing biotic pests that have invaded building structures. Another, albeit less frequent, use may be, for example, in accelerating the solidification of materials and components, where the time required to obtain the handling strength is reduced due to the effect of microwave radiation. The available scientific and technical literature indicates that some materials, such as brick elements, do not change their physical and mechanical properties when exposed to microwave radiation for moisture remediation, although this has not yet been sufficiently verified, and, in contrast, that there is a significant change in properties when microwave radiation is used to accelerate the setting of fresh mixtures, such as those containing a cementitious binder matrix.

This thesis builds on many years of research in the area, complements and refines existing information, provides new insights into the mechanical and physical properties of commonly available building materials that have been exposed to controlled microwave radiation, and compares them with reference values. It also provides an opportunity for further experiments that can build on this research.

The experimental research was conducted on two independent sets of samples. The first experiment was carried out on a set of clay brick samples, using tests according to European standards, and focused on the effect of microwave radiation on compressive strength and water absorption. The experimental specimens were exposed to moisture followed by exposure to microwave radiation for drying and then compared with reference specimens. The data from these experiments suggest that microwave radiation can be used for the rehabilitation of brick elements and there is no significant change in the resulting mechanical properties with respect to the initial condition. The second experiment was carried out on a set of concrete mixtures, where the curing process was accelerated using microwave radiation, and the mechanical and physical properties obtained were compared with those of reference specimens. The data from this experiment suggest that microwave radiation can be used to accelerate the curing of concrete specimens, thereby obtaining the handling strength in a relatively short time, but a reduction in the resulting strength can be expected compared with reference specimens.

**Klíčová slova** Mikrovlnné záření, silikát, polymery, součinitel tepelné vodivosti, pevnost, recyklace.

**Klíčová slova  
v anglickém jazyce** Microwave radiation, silicate, polymer, thermal conductivity coefficient, strength, recycling.

# Obsah

Abstrakt.....	12
1 Úvod a cíle práce .....	14
2 Aktuálnost tématu .....	16
3 Vlhkostní režim stavebních hmot.....	18
3.1 Obecné poznatky o vlhkostních vlastnostech stavebních látek .....	18
3.2 Fyzikální vlastnosti působení vlhkosti ve stavebních látkách .....	19
3.2.1 Pórovitost .....	19
3.2.2 Nasákavost .....	20
3.2.3 Další fyzikální vlastnosti.....	20
3.2.4 Rovnovážná vlhkost .....	20
3.2.5 Vodní pára .....	21
3.2.6 Ustálená, výrobní a kritická vlhkost.....	23
3.3 Chemický potenciál vlhkosti .....	23
3.4 Vodivost vlhkosti .....	24
3.5 Difuze vodní páry .....	25
3.6 Kondenzace vodní páry .....	27
3.7 Kapilární kondenzace.....	28
3.8 Fyzikální modely pro popis šíření vlhkosti .....	29
3.9 Entalpie .....	32
3.10 Popis šíření kapalně vlhkosti ve stavebních materiálech.....	33
4 Šíření tepla .....	34
4.1 Mechanismy šíření tepla.....	34
4.1.1 Šíření tepla vedením .....	35
4.1.2 Šíření tepla prouděním.....	38
4.1.3 Šíření tepla sáláním .....	40
4.2 Tepelné vlastnosti .....	41
4.2.1 Tepelná vodivost .....	42
4.2.2 Tepelná kapacita .....	51
4.2.3 Součinitel teplotní vodivosti .....	53
4.2.4 Tepelná jímavost.....	55
5 Mikrovlnné záření.....	56

5.1	Generátor mikrovlnného záření.....	61
6	Odstranění vlhkosti ze stavebních materiálů pomocí EMW záření.....	63
6.1	Teoretické základy mikrovlnného vysoušení .....	63
6.2	Maxwellovy rovnice.....	66
6.3	Vysoušení stavebních látek .....	66
6.3.1	Průběh mikrovlnného vysoušení.....	67
6.4	Působení mikrovln na molekuly vody, kovové prvky .....	68
6.5	Biologické účinky mikrovlnného záření.....	69
6.6	Mikrovlnné zařízení pro vysoušení vlhkých stavebních látek.....	70
6.7	Skladba mikrovlnného zařízení.....	70
7	Vymezení problému a stanovení cíle práce.....	73
7.1	Vymezení problémů .....	73
7.2	Vymezení cílů.....	74
7.3	Experimentální program.....	75
8	Experimentální program 1.....	76
8.1	Urychlování tuhnutí betonových směsí.....	76
8.1.1	Hlavním cílem práce je ověření možnosti využití mikrovlnného záření při tuhnutí betonu.....	77
8.2	Využité materiály.....	79
8.2.1	Pojivo – cement.....	79
8.2.2	Další složky .....	85
8.3	Využité zařízení – generátor mikrovlnného záření .....	86
8.4	Materiály a metody .....	87
8.5	Postup experimentálních prací .....	89
8.5.1	Uložení ve vodní lázni .....	90
8.5.2	RTG.....	90
8.5.3	Stanovení objemové hmotnosti (ČSN EN 12390-7).....	90
8.5.4	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu (ČSN EN 13 892-2).....	90
8.5.5	Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN EN 12 190), (ČSN EN 12 390-3) .....	90
8.5.6	Stanovení nasákavosti betonu (ČSN EN 206+A2).....	91
8.6	Výsledky experimentů a diskuze.....	91
8.6.1	Zobrazení vzorků pod elektronovým mikroskopem.....	92
8.6.2	DTA, RTG analýzy .....	93
8.6.3	Diskuze k výsledkům.....	95

8.7	Závěr.....	99
9	Experimentální program 2.....	101
9.1	Vysoušení vlhkosti ze stavebních hmot.....	101
9.2	Využité materiály.....	101
9.2.1	Cihla plná pálená.....	101
9.2.2	Využité zařízení – generátor mikrovlnného záření.....	103
9.3	Materiály a metody .....	104
9.4	Postup experimentálních prací .....	105
9.4.1	Fyzikální a mechanické vlastnosti cihel .....	106
9.4.2	Měření rychlosti ultrazvukových pulzů .....	106
9.5	Výsledky experimentů a diskuze.....	107
9.6	Závěr.....	110
10	Souhrnný závěr.....	112
11	Zdroje.....	113
12	Seznam publikací autora.....	119
12.1	2023.....	119
12.2	2022.....	119
12.3	2021 .....	120
12.4	2020.....	121
12.5	2019.....	121
13	Práce autora na projektech .....	122
14	Užité vzory.....	122
15	Seznam značek a symbolů .....	123

## **Abstrakt**

Mikrovlnné záření je ve stavební praxi hojně využíváno zejména k vysoušení stavebních materiálů, sanaci vlhkého zdiva nebo sterilizaci biotických škůdců, kteří napadli stavební konstrukce. Další, ovšem méně časté, využití může být například při urychlování tuhnutí hmot a dílců, kdy vlivem působení mikrovlnného záření dojde ke snížení potřebné doby pro získání manipulační pevnosti. Dostupná vědecká a technická literatura uvádí, že některé materiály, například cihelné střepy, vystavené mikrovlnnému záření při sanaci vlhkosti nemění své fyzikální a mechanické vlastnosti, ačkoli to dosud nebylo dostatečně ověřeno, a naopak, že dochází ke značné změně vlastností, pokud se mikrovlnné záření využívá k urychlení tuhnutí čerstvých směsí, například těch, které obsahují cementovou pojivovou matici.

Předložená práce navazuje na mnohaletý výzkum v této oblasti, doplňuje a zpřesňuje stávající informace, poskytuje nové poznatky o mechanických a fyzikálních vlastnostech běžně dostupných stavebních materiálů, které byly vystaveny řízenému mikrovlnnému záření, a porovnává je s referenčními hodnotami. Zároveň práce umožňuje navázat na tento výzkum dalšími experimenty.

Experimentální výzkum proběhl na dvou separátních sadách vzorků. První experiment proběhl na souboru vzorků hliněných cihel, byl prováděn pomocí zkoušek podle evropských norem a zaměřoval se na vliv mikrovlnného záření na pevnost v tlaku a nasákavost. Experimentální vzorky byly vystaveny vlhkosti a poté byly exponovány mikrovlnnému záření za účelem odvlhčení a následně byly porovnány s referenčními vzorky. Údaje z těchto experimentů naznačují, že mikrovlnné záření lze využít pro sanaci cihelných střepů a nedojde ke značné změně výsledných mechanických vlastností vůči počátečnímu stavu. Druhý experiment se uskutečnil na souboru betonových směsí, kde proběhlo urychlení tuhnutí za pomoci mikrovlnného záření, a zjištěné výsledky mechanických a fyzikálních vlastností se porovnaly s vlastnostmi referenčních vzorků. Údaje z tohoto experimentu naznačují, že mikrovlnné záření lze použít k urychlení vytvrzení betonových vzorků, čímž se získá manipulační pevnost v relativně krátkém čase, ale lze očekávat snížení výsledné pevnosti ve srovnání s referenčními vzorky.

## **Klíčová slova**

Mikrovlnné záření, silikát, cement, C-S-H gel, cihelný střep, součinitel tepelné vodivosti, pevnost.

## **Abstract**

In construction practice, microwave radiation is widely used for drying building materials, remediating damp masonry or sterilizing biotic pests that have invaded building structures. Another, albeit less frequent, use may be, for example, in accelerating the solidification of materials and components, where the time required to obtain the handling strength is reduced due to the effect of microwave radiation. The available scientific and technical literature indicates that some materials, such as brick elements, do not change their physical and mechanical properties when exposed to microwave radiation for moisture remediation, although this has not yet been sufficiently verified, and, in contrast, that there is a significant change in properties when microwave radiation is used to accelerate the setting of fresh mixtures, such as those containing a cementitious binder matrix.

This thesis builds on many years of research in the area, complements and refines existing information, provides new insights into the mechanical and physical properties of commonly available building materials that have been exposed to controlled microwave radiation, and compares them with reference values. It also provides an opportunity for further experiments that can build on this research.

The experimental research was conducted on two independent sets of samples. The first experiment was carried out on a set of clay brick samples, using tests according to European standards, and focused on the effect of microwave radiation on compressive strength and water absorption. The experimental specimens were exposed to moisture followed by exposure to microwave radiation for drying and then compared with reference specimens. The data from these experiments suggest that microwave radiation can be used for the rehabilitation of brick elements and there is no significant change in the resulting mechanical properties with respect to the initial condition. The second experiment was carried out on a set of concrete mixtures, where the curing process was accelerated using microwave radiation, and the mechanical and physical properties obtained were compared with those of reference specimens. The data from this experiment suggest that microwave radiation can be used to accelerate the curing of concrete specimens, thereby obtaining the handling strength in a relatively short time, but a reduction in the resulting strength can be expected compared with reference specimens.

## **Keywords**

Microwave radiation, silicate, cement, C-S-H gel, brick rubble, thermal conductivity coefficient, strength.

# 1 Úvod a cíle práce

Vlhkostní problematika ve stavebnictví je dnes stále aktuální téma a tvoří jednu z nejméně obtížných oblastí v tomto odvětví. Odstranění vlhkosti ze stavebních látek a konstrukcí je obecně nazýváno jako „doplňková sanační metoda“. Samotné zabránění difuze vlhkosti do hmot a konstrukcí je pak sanace. Hlavním důvodem pro odstranění vlhkosti ze stavebních hmot a konstrukcí je v závažné změně vlastností daných materiálů, jak fyzikálních, tak mechanických.

V současné době je známá celá řada metod pro odstranění vlhkosti ze stavebních hmot a konstrukcí. Je ovšem žádoucí vyvíjet stále účinnější a pro praxi ekonomičtější a ekologičtější varianty. Základním kritériem je zpravidla rychlost a účinnost zařízení a dále také ekonomická náročnost provozu a nákladů na pořízení přístrojového vybavení.

Předložená disertační práce je zaměřena na oblast využití mikrovlnného záření ve stavební i laboratorní praxi, a to nejen jako doplňková sanace stavebních hmot, ale i jako potenciální urychlovač tuhnutí látek.

Metoda mikrovlnného vysoušení patří mezi nejrychlejší a nejefektivnější způsoby odstranění vlhkosti ze stavebních materiálů a konstrukcí. Tato technologie je sice známa již delší dobu, avšak kvůli nedostatečnému povědomí o ní není ve stavební praxi využívána zásadně. Omezené povědomí o základních principech mikrovlnného vysoušení, obavy o zdravotní rizika spojená s mikrovlnným zářením a vyšší cena mikrovlnných vysoušecích generátorů jsou překážkou pro masový rozvoj této metody. V důsledku toho existuje omezený zájem firem o využití mikrovlnné radiace pro sušení staveb, a zároveň i malá informovanost projektantů a stavitelů v této oblasti. Tato kombinace faktorů brání v širším uplatnění mikrovlnného vysoušení ve stavebnictví a omezuje jeho celkový rozvoj.

**Hlavním cílem disertační práce je analýza působení mikrovlnného záření na stavební hmoty**, a sice ve dvou úrovních. Jednou je analýza působení mikrovlnného záření na fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot, případně stavebních konstrukcí vystavených mikrovlnnému záření. Druhou úrovní je analýza působení mikrovlnného záření na čas hydratace, tuhnutí a tvrdnutí a následné fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot.

První část práce je rešeršní, obsahuje celkem 6 kapitol, kde je popsána teorie o šíření tepla, vlhkosti a mikrovlnném záření využívané ve stavební praxi.

Druhá část práce je rozdělena na **dvě hlavní kapitoly** a je věnována problematice působení mikrovlnného záření stavební hmoty, a to na čerstvé směsi se silikátovou pojivovou složkou a na keramické zdící prvky.

Průběh experimentální části je členěn v obou případech stejným způsobem, na stejné kapitoly.

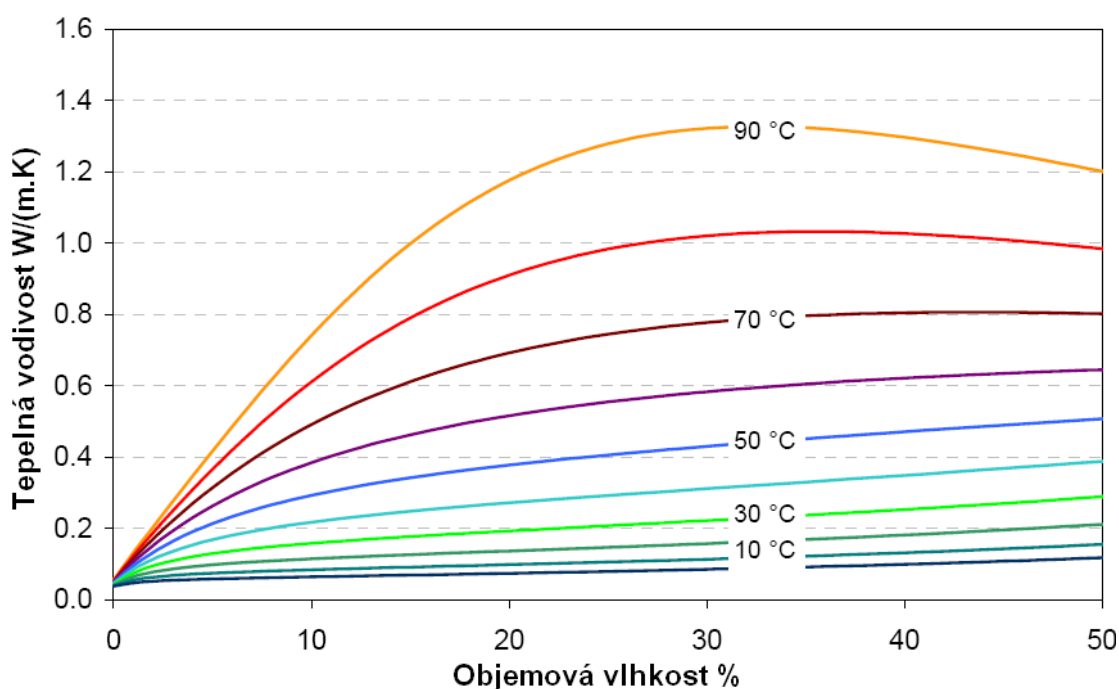
**První experiment** se zabývá problematikou využití mikrovlnného záření na čerstvé směsi betonové směsi.

Byly vytvořeny dvě sady vzorků se silikátovým pojivem, přičemž proces tuhnutí a tvrdnutí probíhal u první sady na vzduchu. u druhé sady vzorků byl proces tuhnutí urychlen pomocí mikrovlnného záření.

**Druhý experiment** se zabývá problematikou využití mikrovlnného záření na cihelné prvky a na změnu jejich mechanických a fyzikálních parametrů po expozici mikrovlnným zářením.

## 2 Aktuálnost tématu

Zásadní vliv na mechanické vlastnosti a fyzikálních vlastnosti stavebních materiálů má zejména vlhkost a teplota. Se zvyšujícím se množstvím vlhkosti stavebních hmot, konstrukcí a dílců se snižují jejich mechanické vlastnosti a tepelně technické vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ ). Změnu součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti a teplotě můžeme vidět na obrázku 1., kde jsou hodnoty součinitele tepelné vodivosti obecného materiálu vyznačeny v izotermách a v závislosti na vlhkosti materiálu.<sup>1,2</sup>



Obrázek 1. Tepelná vodivost minerální vlny v závislosti na objemové vlhkosti se střední teplotou jako parametrem podle modelu vrstev<sup>2</sup>

Dalším možným a významným problémem, který přímo souvisí s vlhkostí stavebních hmot a konstrukcí, je případné napadení biologickou korozií.

V zásadě se jedná o vegetaci mikroorganismů na vlhkých konstrukcích. Většinou se jedná o mikroskopické houby, plísňe, ale mohou zde vznikat i dřevokazné houby.

Plísně významně nedegradují stavební materiály a konstrukce nicméně zcela zásadně a negativně ovlivňují vnitřní mikroklima objektu – uvolňují do prostoru své výtrusy (spory slouží k nepohlavnímu rozmnožování a přežití v nepříznivých podmínkách na dlouhou dobu).

<sup>1</sup> Šuhajda, K. Analysis of Interaction of Microwave Radiation with Moisture in Porous Building Materials. Habilitation Thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2016.

<sup>2</sup> Ochs, Fabian and H. M. Müller-Steinhagen. "Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials." (2005).

Tyto výtrusy pak mohou způsobovat alergické reakce osob, které obývají napadené prostory a v horším případě i rakovinu.<sup>1</sup>



Obrázek 2. Fotografie plísně v koutě místnosti<sup>3</sup>



Obrázek 3. Fotografie plísně pod mikroskopem<sup>4</sup>

Dřevokazné houby naopak degradují mechanické vlastnosti napadených konstrukcí, což může mít za následek následnou destrukci konstrukce. Význam vysoušení konstrukcí a hmot je dále umocněn tím, že mikrovlnná radiace má schopnost eliminovat tyto organismy při vysoušecím procesu.<sup>1</sup>



Obrázek 4. Fotografie dřevokazné houby na dřevěném stropu<sup>5</sup>

<sup>3</sup> Jak vyvětrat plíseň. Online. Naše Hobby. 2020. Dostupné z: <https://www.nasehobby.cz/jak-vyvetrat-plisen/>.

<sup>4</sup> DOSEDĚLOVÁ, Adriana. Víme, jak vyvětrat plíseň. Online. Český kutil. 2019. Dostupné z: <https://ceskykutil.cz/clanek-22187-vime-jak-na-plisen-v-byte>.

<sup>5</sup> RUBEŠOVÁ, Marie. Dřevokazné houby – a jak na ně. Online. Chatař chalupář. 2019. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/drevokazne-houby-%E2%80%93-a-jak-na-ne/>

### 3 Vlhkostní režim stavebních hmot

Důležitým faktorem, který má zásadní vliv na rozhodování o vhodnosti použití stavebních materiálů a konstrukcí v oblasti stavebnictví, je úroveň vlhkosti. Vliv vlhkosti má výrazný dopad na většinu mechanických a fyzikálních vlastností stavebních materiálů a stavebních konstrukcí. Co se týče mechanických vlastností, ovlivňuje zejména zpracovatelnost, pevnost, odolnost proti mrazu a životnost stavebních materiálů. z hlediska fyzikálních vlastností má zejména v dnešní době velký význam pro sledování tepelně-technických charakteristik, které mají význačný dopad na životní prostředí. Materiály s nadměrnou vlhkostí jsou také náchylné k biologické korozi, zejména v případě výskytu plísní.

#### 3.1 Obecné poznatky o vlhkostních vlastnostech stavebních látek

Stavební materiály zpravidla nejsou zcela suché, s výjimkou některých specifických případů. Voda proniká do těchto materiálů již během výrobního procesu, dále během skladování a vlivem klimatických podmínek a mikroklimatu se do nich dostává prostřednictvím difuze vodních par, transmise, kapilárního vzestupu, nasákavosti a sorpce.

Ve stavební praxi se voda vyskytuje v různých skupenstvích, konkrétně ve formě ledu, kapaliny a vodní páry. Nejvíce jsou vlhkosti vystaveny vnější stavební konstrukce, zejména obvodové stěny a střechy. Konstrukce, které nejsou vystaveny teplotním nebo vlhkostním rozdílům a nemají přímý zdroj vlhkosti, jsou naopak méně citlivé na změny vlhkosti.

Pro správný návrh opatření k eliminaci vlhkosti ve stavebních konstrukcích je nezbytné pochopit principy a chování vody v těchto konstrukcích. Klíčovými vlhkostními vlastnostmi jsou rovnovážná vlhkost (sorpce), nasákavost, kapilární vzestup, difuze vodních par a vodivost vlhkosti.

Vlhkost stavebního materiálu se týká obsahu vody v různých formách (pevná, kapalná, plynná) a má významný vliv na mnoho mechanických a fyzikálních vlastností těchto materiálů. Množství vlhkosti v cihelném zdivu se klasifikuje podle normy ČSN P 73 0610<sup>6</sup> do různých stupňů podle tabulky 1.

---

<sup>6</sup> ČSN P 73 0610 (730610) Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2000.

Tabulka 1. Stupeň vlhkosti zdiva<sup>6</sup>

Stupeň vlhkosti	Vlhkost zdiva $u_m$ v %
Velmi nízká	$u < 3$
Nízká	$3 < u < 5$
Zvýšená	$5 < u < 7,5$
Vysoká	$7,5 < u < 10$
Velmi vysoká	$u > 10$

Vlhkost stavebního materiálu je ovlivňována vlhkostí okolního prostředí, které materiál obklopuje. Za stabilních teplotních a vlhkostních podmínek vytváří stavební materiál rovnovážnou (sorpční) vlhkost, která odpovídá okolní vlhkosti vzduchu.

Vlhkost stavebního materiálu během své životnosti podléhá vlivům mnoha faktorů a je proto proměnlivá. Vlhkost, kterou má stavební materiál během výrobního procesu, se nazývá výrobní vlhkost. Po ukončení výrobního procesu se tato výrobní vlhkost postupně mění, buď se zvyšuje nebo snižuje v závislosti na okolních klimatických podmínkách a vnitřním prostředí, až dosáhne stabilního stavu, který se nazývá ustálená vlhkost.<sup>6,7</sup>

## 3.2 Fyzikální vlastnosti působení vlhkosti ve stavebních látkách

Základními charakteristikami vlivu vlhkosti na stavební materiály, které jsou dlouhodobě zkoumány v laboratořích a zkušebnách specializovaných na testování stavebních materiálů, zahrnují pórovitost, nasákavost, vzlínavost a rovnovážnou vlhkost.

### 3.2.1 Pórovitost

U většiny stavebních látek je v určitém objemu tuhé fáze přítomna také jiná fáze. Prostory, které jsou zaplněny kapalnou a plynnou fází a jejichž rozměr je podstatně menší než rozměry uvažovaného tuhého tělesa, nazýváme póry, a to bez ohledu na jejich tvar, vzájemnou velikost a míru propojenosti.

Látku označujeme jako pórovitou, jestliže jsou póry v látce rozděleny tak, aby na systém mohla být aplikována kritéria kontinua, tzn. aby mohl být definován reprezentační objem.

Voda obvykle zaplňuje póry buď zčásti nebo úplně a jen výjimečně se stane, že pórovité materiály neobsahují žádnou vodu, jsou tedy buď absolutně suché.

<sup>7</sup> MRLÍK, F. - Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí, 1. vyd., Alfa, Bratislava 1985, ISBN #9955.

Voda v pórech obsažená nebývá čistá, obsahuje větší či menší množství různých rozpuštěných látek. Pokud jsou jejich koncentrace malé, lze rozpuštěné látky zanedbat.<sup>9</sup>

### 3.2.2 Nasákavost

Nasákavost je poměr hmotnosti vody, která je absorbována pórovitým stavebním materiálem ponořeným do vody za běžného atmosférického tlaku, k hmotnosti tohoto materiálu po vysušení. Na základě nasákavosti lze určit celkové množství tzv. otevřených pórů v materiálu a jeho odolnost vůči mrazu.<sup>7</sup>

### 3.2.3 Další fyzikální vlastnosti

Kromě těchto vlastností se zkoumají i další fyzikální vlastnosti vody ve stavebních materiálech, jako je například difuze vodních par. v případě kapilárně porézních materiálů je sledována kapilární vodivost pro kapalnou formu vlhkosti. Mezi nověji zkoumané fyzikální vlastnosti vody patří chemický potenciál vlhkosti a kritická vlhkost.<sup>7,8</sup>

### 3.2.4 Rovnovážná vlhkost

V ustálených teplotních a vlhkostních podmínkách se vytvoří rovnováha mezi vlhkostí stavebního materiálu a vlhkostí okolního vzduchu. Tuto vlastnost nazýváme rovnovážnou vlhkostí, často také sorpční vlhkostí. Rovnovážnou vlhkostí rozumíme množství vlhkosti, kterou materiál přijme z okolního vzduchu, za předpokladu, že teplota a vlhkost zůstávají stabilní.

Rovnovážná vlhkost může být charakterizována jako ustálený stav vlhkosti, který materiál dosáhne v čase, při konstantních teplotních a vlhkostních podmínkách.

Protože jsou ale tyto podmínky pro zabudované materiály nespílitelné, vyjadřuje se rovnovážná vlhkost závislostí:

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

kde  $u_{ms}$  je hmotnostní rovnovážná vlhkost v %,

$\varphi$  je relativní vlhkost vzduchu v čase,

$t$  je teplota okolního prostředí v °C.

---

<sup>8</sup> BALÍK, M. Vysušování zdiva I. druhé rozšířené vydání, Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-856-3.

Rovnovážná vlhkost vzduchu je závislá na několika faktorech, včetně teploty, relativní vlhkosti vzduchu a atmosférického tlaku. Při konstantním atmosférickém tlaku je rovnovážná vlhkost především závislá na teplotě a relativní vlhkosti okolního vzduchu.<sup>1</sup>

### 3.2.5 Vodní pára

V oblasti stavebnictví hraje klíčovou roli schopnost materiálů pohlcovat vodní páru. Když je parciální tlak vodní páry v porézním stavebním materiálu nižší než v okolním prostředí, dochází k absorpci vlhkosti materiálem a k hromadění vlhkosti na rozhraní mezi plynnou a pevnou fází materiálu. Naopak, když je parciální tlak vodní páry ve stavebním materiálu vyšší než v okolním prostředí, vodní páry se uvolňují z materiálu, dokud nedojde k vyrovnání s parciálním tlakem vodní páry v okolním vzduchu.

Tento proces, který je řízen mezipovrchovými silami, se nazývá sorpce. Sorpce je společný termín pro absorpci (pohlcování) a adsorpci (přilnavost) vodní páry k povrchu nebo uvnitř materiálu, a často zahrnuje i chemisorpci, což je trvalejší chemické vázání molekul na povrchu materiálu.

Adsorpce je způsobena van der Waalsovými silami, které přitahují molekuly kapalin a plynů k povrchu tuhých látek. Během absorpce dochází k difuzi komponentů plynné a kapalné fáze dovnitř tuhého materiálu, kde vytvářejí tuhé roztoky. v případě chemisorpce se uplatňují chemické síly, které mají mnohem pevnější vazby než síly fyzikální.

Pro popis rovnovážných stavů, které nastávají při konstantní teplotě, se používá sorpční izoterma. Rovnice popisující sorpční izotermy byly definovány H. Freundlichem a I. Langmuirem.<sup>7</sup>

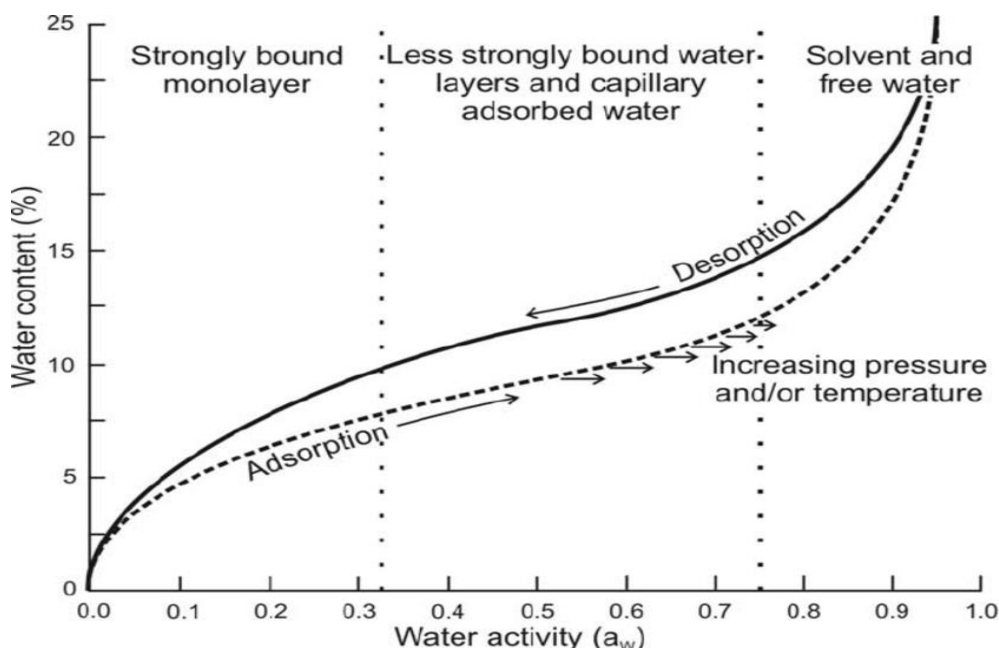
$$a_d = \frac{k_1 p}{1 + k_2 p}$$

Kde  $a_d$  je množství adsorbovaného plynu v  $m^3$ ,

$p$  je tlak plynu v Pa,

$k_1, k_2$  jsou konstanty.

Korekční křivka, která popisuje vztah mezi vlhkostí stavebního materiálu a relativní vlhkostí vzduchu při konstantní teplotě, se nazývá izoterma rovnovážné vlhkosti. Její typický tvar lze snadno pozorovat na Obrázku 5.



Obrázek 5. Průběh adsorpční a desorpční izoterm<sup>9</sup>

Křivka izotermie rovnovážné vlhkosti má obvykle dvě větve. Větev 1 odpovídá rovnováze při procesu zvyšování vlhkosti, což vede k sorpci vlhkosti stavebním materiálem. Větev 2 odpovídá rovnováze při procesu snižování vlhkosti, což zahrnuje desorpci vlhkosti ze stavebního materiálu.

Maximální rovnovážná vlhkost, kterou materiál dosáhne při setrvalé relativní vlhkosti vzduchu  $\varphi$ , se nazývá hygroskopická vlhkost (označuje se jako  $u_{mh}$ ). Vždy platí, že desorpční křivka je při stejné teplotě nad sorpční křivkou. Rozdíl mezi těmito dvěma větvemi se nazývá hystereze, ačkoliv přesné příčiny tohoto jevu nejsou vždy zcela jednoznačné.

Stavební materiály mohou zaujímat vyšší vlhkost než vlhkost hygroskopická. Existují dvě hlavní situace:

- A) Rovnovážný stav při kontaktu materiálu s vodní párou.
- B) Rovnovážný stav při přímém kontaktu materiálu s vodou.

Rovnovážná vlhkost je klíčovým faktorem pro určení ustálené vlhkosti stavebních materiálů ve stavebních konstrukcích.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Airaksinen, Sari. (2023). Role of Excipients in Moisture Sorption and Physical Stability of Solid Pharmaceutical Formulations.

### 3.2.6 Ustálená, výrobní a kritická vlhkost

Ustálená vlhkost je stav, který stavební materiál nebo konstrukce dosáhnou po delší době běžného užívání stavby na konkrétním místě. Tato vlhkost odráží podmínky a prostředí, ve kterém je materiál nebo konstrukce umístěn, a může být různá pro různé materiály a podmínky.

Naopak, výrobní vlhkost je vlhkost, kterou má stavební materiál těsně po své výrobě. Tato vlhkost se s časem postupně upravuje a mění pod vlivem okolních klimatických podmínek a vnitřního prostředí stavby, a to až dosáhne ustálené hodnoty vlhkosti. Během tohoto procesu může docházet k fluktuacím vlhkosti v důsledku faktorů jako jsou dlouhodobé deště, difuze vodních par nebo změny vnitřního provozu budovy.

Roční rozsah změn ustálené vlhkosti je pro každý stavební materiál nebo konstrukci různý a závisí na mnoha faktorech, včetně místního klimatu a podmínek.<sup>7</sup>

Kritická vlhkost představuje maximální vlhkost stavebního materiálu, která je akceptovatelná pro použití ve stavební praxi. Jakmile tato vlhkost překročí určitou hranici, dochází k tak značným změnám ve vlastnostech materiálu, že se stává jeho použití v rámci stavebních aplikací nežádoucím, nevhodným a často i nebezpečným.

Hodnota kritické vlhkosti je stanovena pro jednotlivé stavební materiály podle příslušných norem a standardů, obvykle jako maximální povolená hmotnostní vlhkost stavebního materiálu, který lze bezpečně použít ve stavebnictví. Tato hodnota je důležitá pro zajištění bezpečnosti, dlouhodobé trvanlivosti a kvality stavebních konstrukcí.<sup>7</sup>

### 3.3 Chemický potenciál vlhkosti

Chemický potenciál vlhkosti je termodynamickým potenciálem, který ovlivňuje přenos vlhkosti v materiálech. Jeho gradient (rozdíl v chemickém potenciálu mezi dvěma body) představuje hlavní hybnou sílu, která řídí pohyb vlhkosti. Chemický potenciál vlhkosti je definován jako parciální změna volné entalpie  $G$  vzhledem k množství vlhkosti ( $m_w$ ) při konstantním tlaku, teplotě a množství ostatních složek materiálu.

$$\mu_u = \left. \frac{\partial G}{\partial m_w} \right|_{p, T, m_i \neq m_w},$$

kde  $\mu_u$  je chemický potenciál vlhkosti obsažené v  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,

$G$  je volná entalpie v J,

$p$  je barometrický tlak v Pa,

$T$  je termodynamická teplota v K,

$m_i$  je hmotnost látky v kg,

$m_w$  je hmotnost vody v kg,

$m_i \neq m_w$  značí, že děj probíhá při konstantních hmotnostech vše složek systému s výjimkou hmotnosti vody obsažené v látce.

Jedná se o důležitý koncept v oblasti termodynamiky a transportu vlhkosti, který pomáhá popsat, jak vlhkost migruje v materiálech a jaké síly ji pohání.<sup>1</sup>

Chemický potenciál vlhkosti má zásadní význam, protože umožňuje určit vlhkost v různých částech stavebního materiálu nebo konstrukce a identifikovat potenciální zdroje vlhkosti. Vlákna vlhkosti se vždy přesouvají z oblasti s vyšším chemickým potenciálem do oblastí s nižším potenciálem v souladu s termodynamickými zákony.

Tato znalost je klíčová zejména v nerovnovážných stavbách, kde jsou složené konstrukce, a umožňuje určit směr toku vlhkosti. To je důležité pro správnou konstrukci a izolaci staveb, protože umožňuje identifikovat, odkud a jakým způsobem může vlhkost pronikat do stavebních materiálů. Na základě této informace lze navrhnout opatření ke kontrole a správě vlhkosti, což má zásadní vliv na trvanlivost a kvalitu stavebních konstrukcí.<sup>7, 10</sup>

### 3.4 Vodivost vlhkosti

Vodivost vlhkosti se týká schopnosti materiálu transportovat vlhkost v kapalném skupenství směrem k jeho povrchu, odkud může být buď odpařována do prostředí nebo difundovat do okolí. Tento proces lze přirovnat k pohybu kapaliny v kapilárách, které v materiálu vytvářejí souvislé vodní kanály.

---

<sup>10</sup> LEBEDA, J. a kolektiv - Sanace zavlhlého zdiva budov, 1. vyd., Praha: SNTL, 1988. ISBN # 7246 :26.00

Transport vlhkosti může probíhat buď při vlhkostním spádu (kdy je gradient vlhkosti při konstantní teplotě) nebo při teplotním spádu (kdy je gradient teploty za současného gradientu vlhkosti). Při vlhkostním spádu a nulovém teplotním rozdílu se používá Lykovův přenosový zákon k výpočtu hustoty hmotnostního toku transmise kapalné vody. Tento zákon se používá pro matematické popisy přenosu vlhkosti v různých materiálech a konstrukcích.<sup>9, 11</sup>

$$q_{mt,1} = -k_m \rho_s \frac{d_u}{d_x},$$

kde  $q_{mt,1}$  je hustota hmotnostního toku kapalné vody v transmisi v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

$k_m$  je součinitel vlhkostní vodivosti při vlhkostním spádu v  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,

$\rho_s$  je objemová hmotnost materiálu v suchém stavu v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

$du/dx$  je gradient vlhkosti v  $\text{m}^{-1}$ .

### 3.5 Difuze vodní páry

Difuze vodní páry se nastává v důsledku rozdílu částečných (parciálních) tlaků vodní páry mezi dvěma oddělenými prostředím, například mezi stavebními materiály, konstrukcemi a vzduchem mezi vnějším prostředím a interiérem budovy. Plyn (vodní pára) difunduje skrze každý pórovitý materiál, pokud jsou póry (mezimolekulární prostory) větší než střední volná dráha molekul plynu (vodní páry). Střední volná dráha molekul  $\text{H}_2\text{O}$  má hodnotu  $2,78 \cdot 10^{-10}$  m, v stavebních materiálech existují makrokapiláry a mikrokapiláry.<sup>1</sup>

V makrokapilárách, kde rozměr pórů  $d$  je mnohem větší než  $10^{-7}$  m, vodní páry se pohybují podle zákona difuze, protože volná dráha molekul vodní páry je menší než průměr pórů materiálu a kapilární kondenzace nenastává.

V mikrokapilárách, kde rozměry pórů jsou mnohem menší než  $10^{-7}$  m, dochází ke kapilární kondenzaci a pohyb vodní páry, jež se řídí zákonem efuze, protože střední volná dráha molekul vodní páry je stejná nebo větší než průměr pórů materiálu.

Schopnost materiálu propouštět vodní páru se vyjadřuje faktorem difuzního odporu ( $\mu$ ), který uvádí, kolikrát je difuzní odpor daného materiálu vyšší než u vrstvy vzduchu se stejnou tloušťkou a při stejné teplotě. Faktor difuzního odporu vzduchu je  $\mu = 1$ .

Obecný vztah pro výpočet součinitele difuze vodní páry ( $\delta$ ) z faktoru difuzního odporu ( $\mu$ ) je daný následujícím vzorcem:

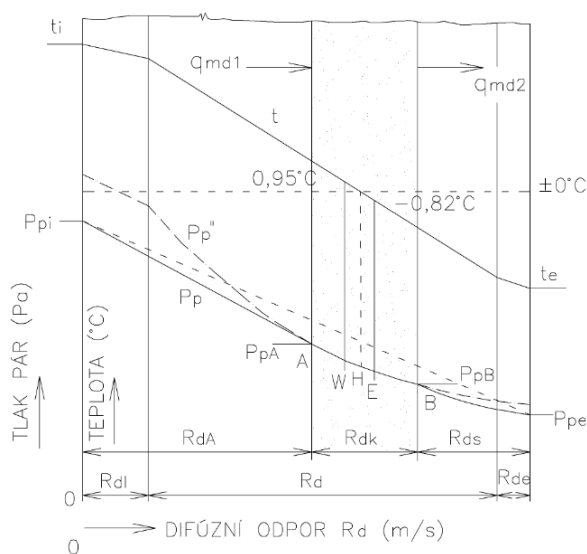
$$\mu = (\delta \cdot N)^{-1}$$

kde  $\mu$  je faktor difuzního odporu,

$N$  je hodnota teplotní difuzní funkce v  $s^{-1}$ ,

$\delta$  je součinitel difuze vodní páry v s.

Difuzní pohyb vodní páry probíhá tak, že vodní pára se přesouvá z místa s vyšším parciálním tlakem (což může znamenat vyšší koncentraci vodní páry nebo vyšší teplotu) směrem k místu s nižším parciálním tlakem. Za určitých teplotních a tlakových podmínek může docházet ke kondenzaci vodní páry v látce nebo konstrukci. Tento jev může vést k tvorbě námrazy a ledu, jak je znázorněno na obrázku 6.



Obrázek 6. Difuzní schéma při vyšetření vnitřní kondenzace difundujících vodních par<sup>7, 10</sup>

Uvedený vztah platí pouze pro suché látky. Pro vlhké látky je tento vztah platný, pokud v látce nedochází ke kondenzaci vodní páry.

Hustota hmotnostního toku vodní páry pro vlhké látky může být vyjádřena jiným vztahem, který zohledňuje kondenzaci vodní páry. Tento vztah by zahrnoval dodatečné faktory, které by braly v úvahu procesy kondenzace a další fyzikální vlastnosti vlhkých materiálů.

Pro komplexní popis chování vlhkosti ve vlhkých materiálech by bylo třeba zohlednit více parametrů a fyzikálních jevů.

Pro běžné užívání objektu je vhodné, aby se difuzní odpor jednotlivých materiálových vrstev ve směru od interiéru směrem ven postupně zmenšoval. To znamená, že by každá materiálová vrstva v konstrukci měla umožňovat snadnější difuzi vodní páry směrem ven, aby se zabránilo tvorbě kondenzované vody. Během většiny roku je směr difuzního toku vodní páry z vnitřních prostor ven, což je preferovaný směr šíření pro udržení konstrukce suché.

V létě se směr difuze vodní páry může na jistou dobu obrátit, ale tato situace obvykle není příliš významná, protože poměry mezi vnější a vnitřní stranou obvodového zdiva nejsou v té době příliš odlišné.

V praxi to znamená, že fasádní omítka by měla mít menší difuzní odpor než zdivo, a fasádní malba by měla mít menší difuzní odpor než omítka. Tímto způsobem se zajišťuje, že vlhkost, která může vstupovat do konstrukce, má možnost snadno difundovat ven, což pomáhá udržet konstrukci suchou a zabránit problémům s vlhkostí. Tato zásada je důležitá zejména při sanaci vlhkých stěn.<sup>7</sup>

### 3.6 Kondenzace vodní páry

Kondenzace vodní páry znamená proces, při kterém se vodní pára proměňuje z plynného stavu na kapalinu. To se stane, když částečný tlak vodní páry dosáhne určitého maximálního hodnoty (označovaného jako tlak nasycené páry) při dané teplotě. Jakmile se částečný tlak vodní páry v prostoru rovná tlaku nasycené páry při určité teplotě, vzduch je vodní parou nasycen a dochází ke kondenzaci. To se může projevit jako mlha, kapičky vody (rosa), nebo jiné formy kondenzace na povrchu nebo uvnitř tělesa.

Při stavebních konstrukcích mohou být podmínky pro kondenzaci splněny jak na povrchu konstrukce, tak i uvnitř konstrukce, pokud je teplota povrchu konstrukce nižší než teplota rosného bodu vzduchu. Obsah vody ve vzduchu se vyjadřuje buď relativní vlhkostí v procentech (%) nebo absolutní vlhkostí v gramy na metr krychlový ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Relativní vlhkost vzduchu ( $\varphi$ ) se vypočítá jako poměr částečného tlaku vodní páry ( $p_p$ ) v pascálech (Pa) k tlaku nasycené páry ( $p_p''$ ) v Pa při dané teplotě.

$$\varphi = \left( \frac{p_p}{p_p''} \right) \cdot 100.$$

Relativní vlhkost vzduchu ( $\varphi$ ) v procentech (%) odpovídá rovnováze mezi tlakem vodní páry ( $p_p$ ) v daném prostoru a tlakem nasycené páry ( $p_p''$ ) při určité teplotě. Když relativní vlhkost dosáhne 100 %, což znamená, že tlak vodní páry v prostoru se rovná tlaku nasycené páry při této teplotě, dochází ke kondenzaci veškeré nadbytečné vodní páry na nejbližším povrchu pevné hmoty.

Důležité je, že relativní vlhkost vzduchu je funkcí teploty. To znamená, že pro stejnou hodnotu tlaku vodní páry (při stejné tenzi) bude relativní vlhkost různá při různých teplotách vzduchu.

To má významný vliv na chování vlhkosti ve stavebních konstrukcích, protože kondenzace může nastat, když teplota klesne na bod rosný, což se může stát v závislosti na teplotních podmínkách a vlhkosti.<sup>7</sup>

### 3.7 Kapilární kondenzace

Kapilární kondenzace je jev, při kterém dochází k vysrážení vodní páry uvnitř pórů nebo mezi mikrokapilárami materiálu nebo konstrukce. Tento jev je způsoben rozdílem mezi tlakem nasycené páry a tlakem vodní páry uvnitř pórů, což vede k tomu, že voda se kondenzuje na vnitřních površích pórů. Kapilární kondenzace se vyskytuje v pórech s poloměrem větším než  $5 \cdot 10^{-7}$  mm, protože poloměr molekuly vody je přibližně  $10^{-7}$  mm. v pórech menších než  $5 \cdot 10^{-7}$  mm nedochází k difuzi vodních par.

Kapilární kondenzace může způsobit zvýšenou vlhkost v materiálech, zejména ve stavebních materiálech s jemnějšími póry, jako jsou jemnozrnné horniny a cementové malty.

To znamená, že za stejných teplotních a vlhkostních podmínek a při stejném objemu pórů se mohou dvě různé látky lišit ve vnitřní vlhkosti, pokud mají póry různého poloměru.

Tento jev má praktický význam ve stavebnictví, protože může ovlivnit vlhkost stavebních materiálů a konstrukcí. Například nové a staré zdivo se může lišit vnitřní vlhkostí kvůli změnám v kapilární struktuře a nasycení solemi u starého zdiva.<sup>7, 10, 11</sup>

### 3.8 Fyzikální modely pro popis šíření vlhkosti

Obecnější metoda pro výpočet šíření tepla ve stavebních konstrukcích zahrnuje také přenos vlhkosti a proudění vzduchu v místnostech. Fyzikální formulace této metody vychází z klasických zákonů zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Tato výpočtová analýza je založena na přístupu nazývaném HAM (což je zkratka anglického názvu "*heat, air, and moisture*" – teplo, vzduch a vlhkost). v této metodě je třeba brát v úvahu také změny materiálových vlastností stavebního materiálu vlivem různých klimatických podmínek, kdy vlhkost proniká do pórů materiálu.

Vliv vlhkosti se projevuje ve všech fázích, ať už jako vodní pára, kapalná voda nebo v některých případech jako led, zejména za zimních podmínek. Proces napouštění a vyprazdňování pórů materiálu, který je obvykle popisován sorpčními izotermy, není zcela reverzibilní.

Problematika šíření tepla a vlhkosti, včetně průniku vzduchu konstrukcemi, je spojena také s materiálovým výzkumem. Současný výzkum zahrnuje například testování izolačních desek vyrobených z přírodních rostlinných vláken, jako jsou dřevité, slámovité nebo konopné vlákna. Tyto materiály někdy překonávají fyzikální vlastnosti syntetických materiálů. Vývoj izolačních desek na bázi přírodních rostlinných vláken však stále probíhá.

Šíření tepla a vlhkosti v porézních stavebních materiálech je úzce provázáno, a proto se dá charakterizovat rovnicemi, které jsou uvedeny v tabulce 2.

---

<sup>11</sup> VLČEK, M.-MOUDRÝ, I.-NOVOTNÝ, M.-BENEŠ, P. *Poruchy a rekonstrukce v pozemních stavbách II.*, Brno: akademické nakladatelství Cerm, s.r.o. Brno, 1996.

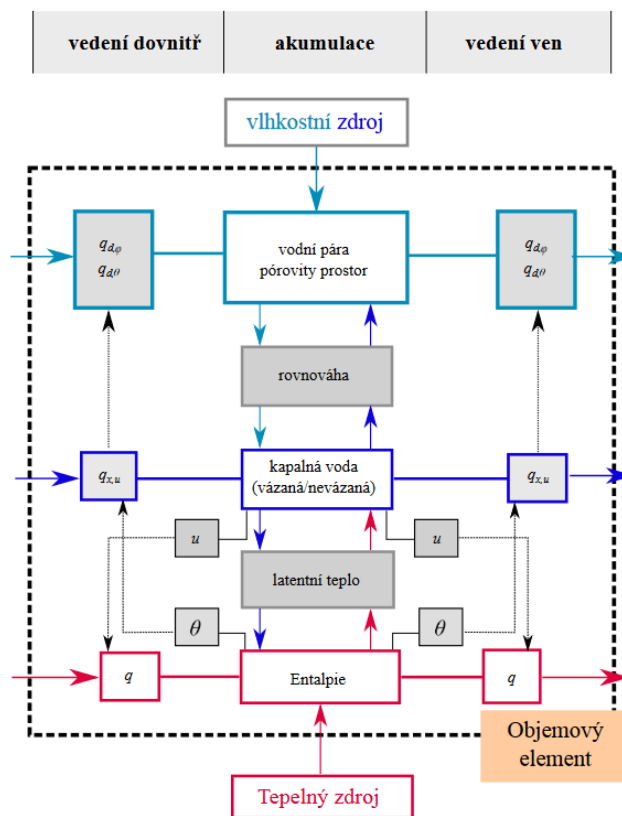
Tabulka 2. Přehled základních mechanismů šíření tepla a vlhkosti ve stavebních látkách<sup>7</sup>

Šíření	Mechanismus	Řídící veličina	Rovnice
Tepla	Vedení tepla	Teplota	$q = -\lambda(u) \frac{\partial \theta}{\partial x}$
Vlhkosti	Difuze vodní páry	Parciální tlak vodní páry	$q_d = -\frac{\delta_{vzduchu}}{\mu(u)} \frac{\partial p_d}{\partial x}$
	Efúze vodní páry	Parciální tlak vodní páry	
	Termodifuze	Teplota	$q_k = -k(u, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}$
Kapalné fáze	Kapilární vedení	Kapilární tlak	$q_{kap} = -k(u) \frac{\partial u}{\partial x}$

V modelu objemového elementu je možné analyzovat všechny procesy související s vlivem teploty, vlhkosti, a množství páry, a to buď v jedné dimenzi, na ploše nebo v celém objemu materiálu. Rozhodnutí o počtu dimenzí závisí na konkrétním problému.

V modelu podle K. Kießla (viz obrázek 7) se teplota, relativní vlhkost a množství páry považují za klíčové proměnné pro popis chování materiálu. Objemový element stavebního materiálu reprezentuje výpočtový model, který rozděluje konstrukci na menší segmenty, které lze řešit samostatně pomocí diskretizace. Jakmile je situace v každém elementu vyřešena, může se řešit celá konstrukce. Element lze chápat jako systém nebo sadu konkrétních vlastností a fyzikálních jevů, které ovlivňují procesy navzájem.

To v praxi vede k rekurzivnímu procesu, a při jeho realizaci můžeme nahlížet na postup jako na postup během určitého časového období s počátečním pohledem na celek.<sup>12</sup>



Obrázek 7. Schématické znázornění tepelných a vlhkostních toků v objemovém elementu pórovitého materiálu<sup>12, 1</sup>

kde  $q_{dt}$  je hustota difuzního toku řízeného teplotou,

$q_{dφ}$  je hustota difuzního toku řízeného vlhkostí,

$q_{ku}$  hustota kapalinového toku způsobená jevem kapilárního vedení množství vody,

$q$  je hustota tepelného toku, která ovlivňuje entalpii,

$u$  je vlhkost,

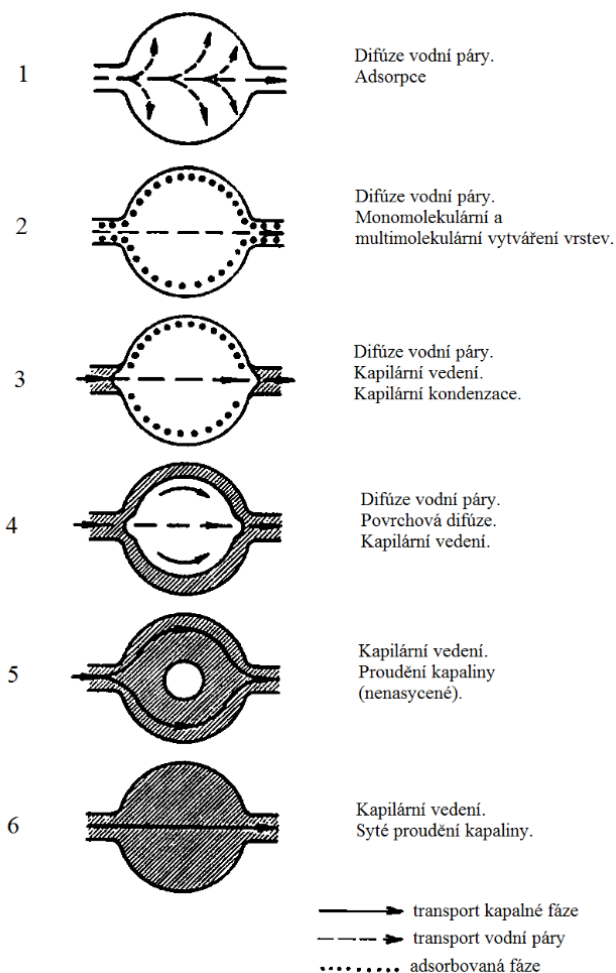
$t$  je střední teplota.

<sup>12</sup> KIEBL, K. *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung*. Dissertation. Universität-Fachbereich Bauwesen, Essen 1983.

### 3.9 Entalpie

Entalpie zahrnuje tepelný obsah způsobený různými tepelnými zdroji, jako je sluneční svit nebo vysoušení. Vlhkostní zdroj může být například déšť. Latentní teplo se uvolňuje nebo pohlcuje během skupenských změn vody, jako je odpařování, kondenzace a další.

Obrázek 8 zobrazuje různé fáze a etapy týkající se procesu. Každá fáze má své dílčí úkony, které lze provádět odděleně. Tímto způsobem lze rozložit časový průběh na menší časové úseky až na ty, které nelze dále rozdělit a jsou považovány za základní axiomy. Tyto axiomy představují konec analýzy. Následně se provádí syntéza, což znamená, že lze z jednoduchých axiomů dojít zpět k původní analýze. Tímto způsobem se odhaluje podstata celého procesu a umožňuje se princip rekurze, což znamená návrat k původnímu bodu analýzy.<sup>1, 12</sup>



Obrázek 8. Přehled vlhkostních stavů póru materiálu při vlhkostní saturaci<sup>12</sup>

### 3.10 Popis šíření kapalné vlhkosti ve stavebních materiálech

Šíření kapalné vlhkosti v porézních stavebních materiálech lze popisovat podobně jako šíření vlhkosti v půdách. Koeficient šíření vlhkosti se vyjadřuje jako hydraulická vodivost  $k$  (v m/s) a je definován podle Darcyho zákona:

$$\vec{v} = -k \cdot \text{grad } h$$

kde  $v = \frac{Q}{A}$  je závislý na hydrostatické výšce  $h$ .

Rovnocennou alternativou výše popsaného přístupu je využití permeability  $k$  v  $\text{m}^2$ , jako hlavního transportního parametru popisujícího vlastnosti materiálu, definované vztahem:

$$\vec{j} = -\rho_w \frac{K}{\eta_w} \text{grad} p_w$$

neboť hustota vlhkostního toku  $j$  závisí na dynamické viskozitě vody  $\eta_w$  v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  a na tlaku vody  $p_w$  v Pa.

Analogicky platí pro hustotu toku vody pomocí hydraulické vodivosti  $k$ :

$$\vec{j} = -\frac{K}{g} \text{grad} p_w$$

Platí vztah mezi hydraulickou vodivostí a permeabilitou:

$$\vec{j} = \rho_w \vec{v}$$

Z toho vyplývá:

$$k = K \frac{\rho_w g}{\eta_w}$$

## 4 Šíření tepla

### 4.1 Mechanismy šíření tepla

Základy teorie tepelně technických vlastností materiálů tvoří především zákony šíření tepla, migrace vlhkosti a filtrace vzduchu. Zákony charakterizují jejich určující veličiny, jejichž hodnoty se následně dále využívají při řešení tepelně technických a energetických problémů budov.

Sdílení tepla (přenos tepelné energie) je nerovnoměrný, termodynamický děj, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase a může nastat třemi různými mechanismy:

1. vedením (kondukcí) - teplo přechází z teplejších míst tělesa na místa studenější, energii si vyměňují jen bezprostředně spolu sousedící částice.
2. prouděním (konvencí) – teplo přenáší látky při svém proudění, což se projevuje jen v kapalinách anebo v plynech. Částice látky mění v prostoru svou polohu ve větším měřítku a unášejí přitom svou energii s sebou.<sup>13</sup>
3. sáláním (radiací) – teplo se šíří z tělesa všemi směry ve formě elektromagnetického vlnění o určité vlnové délce.

Velmi často převažuje jeden mechanismus nad ostatními, pak můžeme při výpočtech brát v úvahu pouze dominantní mechanismus a podřadným mechanismům nepřihlížet. Pokud nelze předpokládat jediný dominantní mechanismus musíme uvažovat o složeném sdílení tepla (například v pecích).

Tepelným tokem nazýváme tok tepla, který přechází od tělesa s vyšší teplotou k tělesu s nižší teplotou při jejich těsném styku nebo tok proudící prostředím, jímž jsou tělesa obklopena a kterým může procházet vyzařování (sálání).

Přestupem tepla nazýváme výměnu tepla mezi stěnou tuhého tělesa a obtékající kapalinou či plynem.

Prostupem tepla nazýváme sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělnými tuhou deskou.

---

<sup>13</sup> KOLOMAZNÍK, K., SEDLÁŘ, J., MACHÁČKOVÁ, A.: *Teorie technologických procesů III*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 1978, 1.vydání, skriptum VUT.

V tepelné technice budov se zpravidla předpokládá, že se šíří teplo:

- a) prouděním a sáláním mezi vzduchem a povrchovou konstrukcí,
- b) vedením v pevných vrstvách konstrukcí,
- c) vedením, prouděním a sáláním ve vrstvách konstrukcí vyplněných vzduchem (plynem).<sup>13</sup>

#### 4.1.1 Šíření tepla vedením

Vedení (kondukce) tepla je jeden ze způsobů šíření tepla v tělesech, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Šíření tepelné energie v pevných látkách vedením nastane předáním kinetické energie mezi molekulami vlivem teplotních rozdílů. Šíření tepla vedením probíhá i v kapalných a plynných látkách, zde se ovšem uplatňuje ve větší míře šíření spíše tepla prouděním.<sup>14</sup>

Molekuly mají v místě s vyšší teplotou vyšší kinetickou energii. Molekuly s vyšší kinetickou energií předávají část své kinetické energie sousedním částicím s nižší pohybovou energií. k tomu dochází prostřednictvím srážek částic. Částice se ale v objemu hmoty nepohybují, pouze oscilují kolem své rovnovážné polohy.

Rychlost, s jakou se tepelná energie šíří v prostředí, popisuje tepelná vodivost. Porovnání různých látek pak umožňuje fyzikální veličina zvaná součinitel tepelné vodivosti. Hodnota součinitele tepelné vodivosti pak v praxi rozděluje materiály na tepelné vodiče a tepelné izolanty. Vedení tepelné energie vedením pak rozdělujeme z hlediska dynamiky na stacionární a nestacionární.<sup>15</sup>

Pro případ stacionárního vedení tepelné energie budeme uvažovat jednoduchou, rovinnou desku o tloušťce  $d$ , jejíž konce jsou udržovány na konstantních teplotách  $t_2$  a  $t_1$  ( $t_1 > t_2$ ) a deska je homogenní a izotropní, a proto proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám. Podíl rozdílu teploty na teplém a studeném konci látky a vzdáleností obou konců se nazývá teplotní gradient (teplotní spád) a jeho jednotkou je  $K \cdot m^{-1}$ .

$$grad\ t = \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Pak platí, že množství přeneseného tepla  $Q_t$  (velikost tepelného toku), které prochází plochou s desky za čas  $\tau$ , je dáno vztahem:

<sup>14</sup> BRZOBOHATÝ, P.: Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerních materiálů. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, Zlín 2002, s. 15-18

<sup>15</sup> KREMPASKÝ, Július. Meranie Termofyzikálnych veličín. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969. ISBN 71-0,44-69.

$$Q_{\tau} = -\lambda \cdot \tau \cdot S \cdot \frac{dt}{dx} = \lambda \cdot \tau \cdot S \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Teplo procházející plochou  $S$  určuje tzv. tepelný tok. Množství tepla, které projde plochou za čas, se nazývá hustota tepelného toku.<sup>16</sup>

$$q = \frac{Q_{\tau}}{\tau S}$$

Po dosazení platí:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Pokud se vzdálenost  $d$  zmenšuje na  $dx$ , pak se mění na této vrstvě teplota o hodnotu  $-dt$ , po dosazení platí:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

Jedná se o vektorovou veličinu což lze zapsat:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t$$

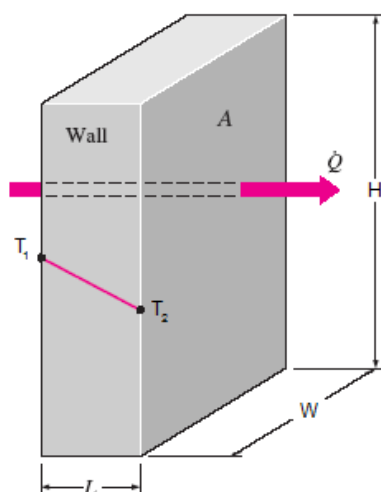
Tento vztah je znám jako Fourierův zákon, který se dá rozepsat do složek:

$$\vec{q} = \vec{i} q_x + \vec{j} q_y + \vec{k} q_z = -\lambda \left[ \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \right]$$

Slovně vyjádřeno, je hustota tepelného toku  $q$  úměrná teplotnímu gradientu. Konstanta úměrnosti  $\lambda$  se nazývá součinitel tepelné vodivosti. Tento zákon byl odvozen z empirického poznatku, že množství tepla, které se převede mezi rovnoběžnými deskami různé teploty, které jsou ve vzdálenosti  $d$ , je úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času a nepřímo úměrné jejich vzdálenosti. Rovnice lze použít k výpočtu hustoty tepelného toku, ale nelze ji použít k výpočtu průběhu teplotního pole. Pro tento případ je nutno použít vztahu, kde se odvodí z energetické bilance elementárního objemu.<sup>13,16</sup>

---

<sup>16</sup> David Průša Ověření metodiky měření materiálových charakteristik tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“. Brno, 2017. 46 stran. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.



Obrázek 9. Znázornění stacionárního vedení tepla jednoduchou, homogenní, izotropní deskou<sup>14</sup>

Řešení nestacionárních polí v pevných tělesech je zvláštní případ energetických bilancí neustálených dějů, který odpovídá časově neustálenému sdílení tepla vyvolanému jiným tepelným způsobem na toto těleso. Mnohdy se zde setkáváme s nestacionárním vedením tepla při ohřevu nebo ochlazení těles, které v technické praxi značný význam.

Při nestacionárním (neustáleném) vedení tepelné energie dochází ke změně teploty v jednotlivých částech tělesa.

Budeme-li uvažovat případ vedení tepelné energie deskou, které nastane při náhlém zvýšení teploty na jednom povrchu desky a desku rozdělíme na plochy o tloušťce  $\Delta x$ , pak se bude hodnota tepelného toku v jednotlivých vrstvách lišit, to je zapříčiněno tím, že část tepla, které do vrstvy vstoupí, se spotřebuje na její ohřátí a tuto tepelnou energii je pak tepelný tok v následující vrstvě nižší.

Teplo, které do vrstvy desky o tloušťce  $\Delta x$ , ploše  $s$  a za čas  $\Delta \tau$ , vstupuje, pak je rovno:

$$Q_1 = q_1 S \Delta \tau$$

Teplo, které vystoupí ze stejné vrstvy a za stejný čas je pak rovno:

$$Q_2 = q_2 S \Delta \tau$$

Platí tedy:

$$Q_1 - Q_2 = (q_1 - q_2) S \Delta \tau = -\Delta q S \Delta \tau$$

Vrstva má určitou měrnou tepelnou kapacitu  $c$ , objemovou hmotnost  $\rho$ , hmotnost  $\Delta m$  a střední teplotu  $t$ . Platí vztah:

$$\Delta m = \rho S \Delta x$$

Přírůstek střední teploty vrstvy za čas  $\Delta \tau$  označíme  $\Delta t$  a tento přírůstek odpovídá právě rozdílu tepel, které do desky vstoupí a které z desky vystoupí.

Pak platí:

$$Q_1 - Q_2 = c\Delta m\Delta t$$

Po dosazení do předešlých vztahů pak dostaneme rovnici:

$$-\Delta q\Delta\tau = c\rho\Delta x\Delta t$$

Po vhodné úpravě získáme rovnici:

$$\frac{\Delta t}{\Delta\tau} = -\frac{1}{c\rho} * \frac{\Delta q}{\Delta x}$$

Přechodem k limitě  $\Delta x$  a  $\Delta\tau$  se blíží k nule dostaneme:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} = -\frac{1}{c\rho} \frac{\partial q}{\partial x}$$

Derivací jednorozměrného Fourierova zákona  $q = -\lambda \frac{dt}{dx}$  dle  $x$  získáme:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Pro časovou změnu střední teploty vrstvy získáme pak rovnici:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Tato rovnice představuje jednorozměrnou diferenciální rovnici vedení tepelné energie.

Pro vícerozměrný případ obecně platí:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} - \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 t = 0$$

Fundamentální řešení diferenciální rovnice vedení tepelné energie v  $n$  rozměrech je:

$$\Phi(x, \tau) = \frac{\chi_{[0, \infty)}(\tau)}{(4\pi\tau)^{n/2}} e^{-\frac{|x|^2}{4a\tau}}$$

Pro zjednodušení se zavádí veličina zvaná teplotní vodivost. Značí se písmenem  $a$ , někdy jako  $k$  a udává, jak se v daném materiálu vyrovnávají teplotní rozdíly.<sup>13, 17</sup>

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

## 4.1.2 Šíření tepla prouděním

Přenos tepelné energie prouděním je charakteristický pro tekuté a plynné látky (případně plazmatu, 4 skupenství), u pevných látek není možné.

---

<sup>17</sup> Bc. David Průša Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“. Brno, 2019. 86 stran. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.

Proudění je vyvoláno uměle, například ventilátorem, nebo přirozeně vlivem sdílení tepelné energie.

Dochází zde k přenosu energie z místa o vyšší teplotě na místo o nižší teplotě makroskopickým tokem částic, tj. z hlediska teorie spojitého prostředí přesunem velkých souborů molekul. Ve vícesložkových soustavách se při sdílení hmoty vytvoří koncentrační gradient, který způsobí difuzi části a odpovídající difuzní přenos energie.

Ten souvisí se sdílením hmoty a ve srovnání s přenosem tepla vlivem proudění není obvykle významný. Přenos energie prouděním je vázaný na pohybující se částice a je o řád až dva intenzivnější než prosté molekulární sdílení (vedení tepla) v téže látce. Oba typy přenosů energie probíhají v pohyblivém prostředí souběžně.

Intenzita přenosu energie prouděním závisí na složce intenzity pohybu částic ve směru požadovaného sdílení tepla, tj. směrem k fázovému rozhraní nebo od fázového rozhraní, které představuje plochu tepelné výměny neboli teplosměnnou plochu. Přičemž hlavní proudění tekutiny probíhá podél tohoto fázového rozhraní.<sup>13</sup>

Proudění tekutiny při sdílení tepla je, jak již bylo řečeno, je volné nebo nucené. Volné je vyvoláno pouze rozdílem hustot (vlivem rozdílu teplot) u teplosměnné plochy a v jádru tekutiny. Až na výjimky, například voda v rozmezí teplot 0 až 3,98 °C, klesá hustota tekutiny se vzrůstající teplotou.

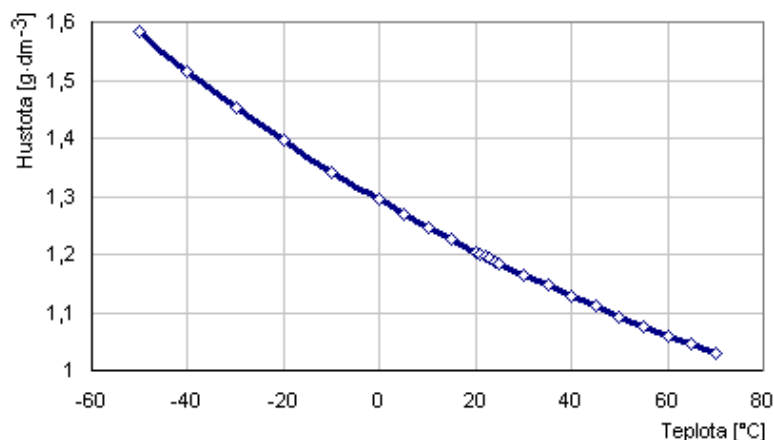
Potom platí, že u teplosměnné plochy s nižší teplotou, než je teplota v jádru tekutiny dochází v gravitačním poli Země k pohybu tekutiny směrem dolů. v jádru tekutiny, kde je vyšší teplota, dochází naopak k pohybu tekutiny směrem vzhůru. v blízkosti nehybné teplosměnné plochy je rychlost proudění nízká, a proudění je zde proto laminární i při turbulentním proudění v jádru tekutiny.

Pro tento případ platí, že se zde vytváří laminární podvrstva, v níž se tekutina pohybuje pouze podél teplosměnné plochy. Napříč touto laminární podvrstvou nemůže tedy nastat přenos energie pohybem částí, ale jen jejich molekulárním pohybem, tedy vedením tepla.

Z jádra tekutiny se energie na rozhraní s laminární podvrstvou přenáší nejen se vedením tepla, ale i pohybem tekutiny. Turbulentní fluktuace rychlosti v jádru tekutiny zvyšují intenzitu přenosu energie. v laminární podvrstvě se přenáší energie pouze vedením. Celý tento mechanismus se nazývá sdílení tepla prouděním.

Stejný mechanismus přenosu energie je při nuceném proudění, které může být realizováno různým způsobem.

Z toho vyplývá různá intenzita přenosu energie prouděním. Například nucené proudění může být realizováno rozdílem tlaků nebo samospádem v trubce, nehybné vrstvě sypkého materiálu, v cyklónu, v nádobě s mechanickým míchadlem.<sup>16, 17</sup>



Obrázek 10. Průběh vlivu teploty na hustotu látky<sup>17</sup>

### 4.1.3 Šíření tepla sáláním

Sálání je proces, při kterém látka emituje energii do prostoru ve formě elektromagnetického záření.

Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním není přenos tepelné energie sáláním podmíněn látkovým prostředím, avšak za předpokladu, že jsou tělesa v prostředí, které propouští záření. Takové prostředí nazýváme transparentní. v praxi to znamená, že k sálání dochází i ve vakuu.

Ke sdílení tepla sáláním dochází mezi dvěma tělesy tak, že se z jednoho tělesa energie ve formě elektromagnetického vlnění přenáší na druhé těleso. Opačný proces nastává u druhého tělesa, které část energie, která dopadne na povrch, absorbuje a přemění jí na vnitřní energii (absorbovaná radiační energie) a část odrazí.

Výkon vyzařujícího předmětu závisí na jeho povrchu  $s$  a teplotě  $T$  (v kelvinech) a je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$P_r = \sigma \epsilon S T^4$$

Kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $\epsilon$  je označení pro emisivitu povrchu předmětu a nabývá hodnot z intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ .

Předmět s emisivitou rovno nule je pak nazýváme bílý zářič a předmět s emisivitou rovno hodnotě jedna pak nazýváme černý zářič (záření Slunce se poměrně dobře blíží záření absolutně černého tělesa s povrchovou teplotou přibližně 5800 Kelvinů).

Výkon, s jakým předmět absorbuje energii tepelného záření, je:

$$P_a = \sigma \varepsilon S T_0^4$$

Předmět, o teplotě  $T$ , vyzařuje energii do okolí, ale současně ji i přijímá. Pokud nebudeme uvažovat přínos záření odraženého je úhrnný výkon dodaný tepelným zářením:

$$P_\Sigma = P_a - P_r = \sigma \varepsilon S (T_0^4 - T_1^4)$$

Celkový tok zářivé energie  $E$  na těleso může být z části odražen (reflexe)  $E_r$ , pohlcen (absorpce)  $E_a$  a částečně propuštěn (transparence)  $E_t$ .

Pak platí:

$$E = E_r + E_a + E_t$$

Množství absorbované a odražené energie závisí na emisivitě druhého tělesa. Těleso, které odrazí 100 % energie se nazývá absolutně bílé těleso a naopak těleso, které absorbuje 100 % energie se nazývá absolutně černé těleso. Na Zemi se ovšem taková tělesa nevyskytují a jsou jen teoretickým předpokladem pro matematicko-fyzikální výpočty.<sup>16,17</sup>

## 4.2 Tepelné vlastnosti

Do oblasti, která charakterizuje tepelné vlastnosti, se řadí především materiálové konstanty jako například měrné teplo, tepelná vodivost, teplotní vodivost, tepelná jímavost a také teplotní roztažnost daného materiálu.

V této kapitole se nejvíce zaměříme na součinitel tepelné vodivosti jakožto hlavní parametr, který rozděluje materiály na tepelné vodiče a izolanty. Zejména v oblasti stavebních izolací a úspory tepelné energie se zabýváme izolačními materiály jenž mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti pod  $0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Čím nižší je hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím hůře materiál vede teplo a je tedy lepším tepelně-izolačním materiálem. v minulosti se používala řada přírodních, organických materiálů, jako tepelné izolanty, které jsou v současné době na ústupu (sláma, dřevo nebo korek) a to zejména kvůli ceně (přestože má například korek nesporné výhody). v dnešní době patří mezi nejvíce používané izolační materiály polystyrén, minerální vlna, polyuretan atd.

### 4.2.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost ve fyzice označuje schopnost dané látky vést teplo (například konstrukcí). Představuje tedy rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné části konstrukce (zahřáté), do jiných chladnějších částí.

Tepelná vodivost dané látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  (měrná tepelná vodivost).

Součinitel tepelné vodivosti je definován jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád, a přitom se předpokládá, že se teplo šíří pouze v jednom směru (například v desce s rovnoběžnými povrchy). Dle této definice pak můžeme definovat součinitel tepelné vodivosti jako výkon (tzn. teplo za jednotku času), který projde každým čtverečným metrem desky o tloušťce jeden metr, jejíž jedna strana má teplotu o 1 Kelvin vyšší než druhá.

Podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti se rozdělují materiály na dobré a špatné vodiče tepla. k dobrým vodičům patří kovy, například stříbro ( $419 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), hliník ( $209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a zinek ( $113 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Vodivost kapalin je přibližně tisíckrát menší než kovů.

Ještě menší tepelnou vodivost mají plyny, a proto jsou porézní látky špatnými vodiči tepla. Stavební a izolační materiály patří mezi špatné vodiče tepla. Jejich hodnota součinitele tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí  $0,024 \div 5,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .<sup>14</sup>

Hodnota součinitele tepelné vodivosti je závislá na vlastnostech materiálů, objemové hmotnosti, vlhkosti, teplotě a pórovitosti, přičemž obecně lze součinitel tepelné vodivosti vyjádřit vztahem:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_a - \theta_b) S \tau}$$

Reálná hodnota součinitele tepelné vodivosti je pak funkcí řady vnitřních a vnějších proměnných:

$$\lambda = f(\rho_v; w_m; \theta; PR; \varphi(I))$$

kde  $\rho_v$  je objemová hmotnost materiálu,

$w_m$  je hmotnostní vlhkost materiálu,

$\theta$  je teplota materiálu,

$PR$  je pórovitost,

$\varphi(I)$  je funkce vnitřních proměnných – chemicko-mineralogické složení, fázové složení, krystalické modifikace...<sup>13</sup>

Tabulka 3. Přehled hodnot součinitelů tepelné vodivosti pro různé materiály v suchém stavu při teplotě 20 °C<sup>18</sup>

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Konopná izolace	0,038 - 0,040	25–42
Ovčí vlna	0,034 - 0,049	12,5 - 25
Dřevovláknitá izolace	0,040	250
Sláma	0,050	90–135
Minerální vata	0,038 - 0,050	100–200
Pěnový polystyrén	0,033 - 0,044	15–40
Vzduch (za normálních podmínek)	0,0262	-
Hutný beton	1,230 - 1,360	2100–2300
Nepálená cihla	1,100	2050
Diamant	895-2300	
Zlato	317	
Železo	73	
Sklo	0,6 -1	
Měď	395	

<sup>18</sup> Tabulka hodnot součinitele tepelné vodivosti a objemové hmotnosti materiálů: Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Online. Přírodní stavba. Dostupné z: <http://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>

#### 4.2.1.1 Vliv hustoty, pórovitosti a objemové hmotnosti na součinitel tepelné vodivosti

Mezi hustotou, objemovou hmotností a pórovitostí platí následující vztah:

$$\rho_s = \rho \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

kde  $\rho_s$  je objemová hmotnost v suchém stavu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $\rho$  je hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $p$  je pórovitost [%].

Pórovitost vyjadřuje množství póru v materiálu a je dána vztahem:

$$p = \frac{V_p}{V} \cdot 100$$

kde  $V_p$  je objem póru [ $\text{m}^{-3}$ ],  
 $V$  je objem materiálu [ $\text{m}^{-3}$ ].

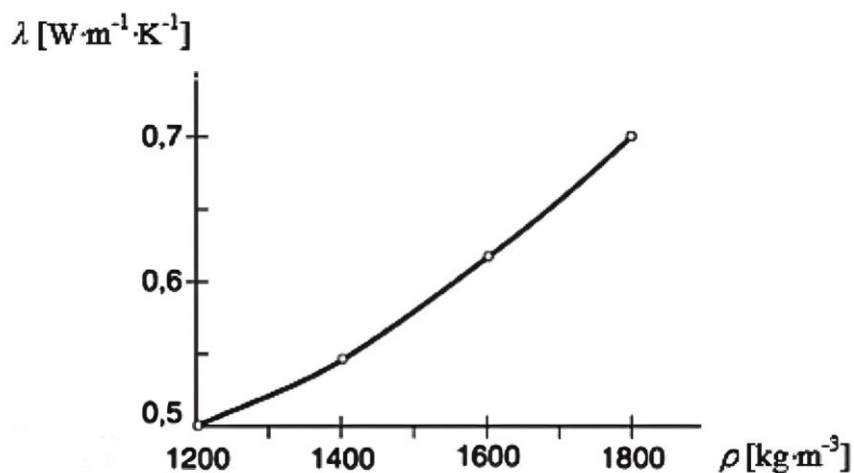
Zanedbá-li se hmotnost vzduchu v pórech a je-li materiál suchý, lze pórovitost vyjádřit vztahem:

$$p = \frac{\rho - \rho_s}{\rho_s}$$

kde  $p$  je pórovitost [%],  
 $\rho$  je hustota, [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $\rho_s$  je objemová hmotnost v suchém stavu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

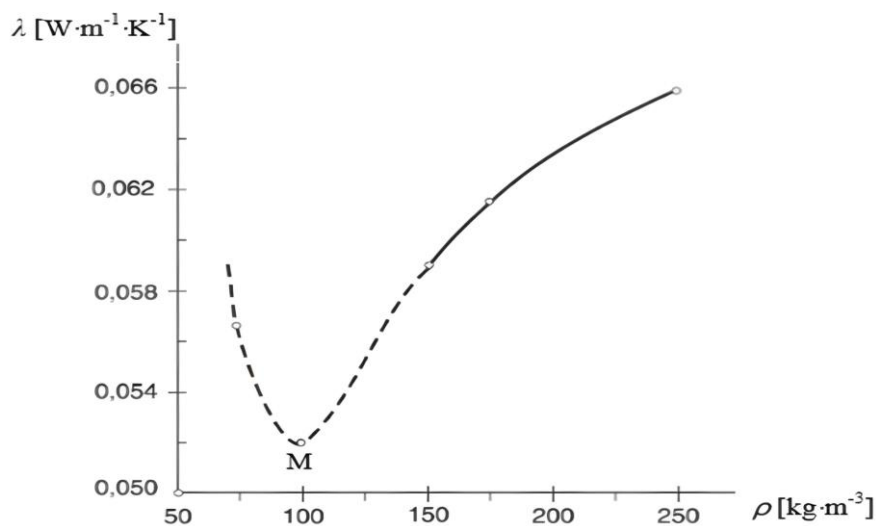
V pórech materiálu je vzduch, jehož hodnota součinitele tepelné vodivosti, za normálních podmínek, udává nejnižší možnou hodnotu součinitele tepelné vodivosti stavebních a tepelněizolačních materiálů (pokud jsou pórovité). Vzhledem k faktu, že pevné části materiálu mají několika násobně větší součinitel tepelné vodivosti než vzduch, je zřejmé, že čím je víc materiál pórovitý, tím může být hodnota součinitele tepelné vodivosti menší.

Ze vztahů vyplývá, že mezi pórovitostí a objemovou hmotností platí nepřímá úměrnost: čím je větší pórovitost materiálu, tím je menší objemová hmotnost (nemění-li se hustota materiálu). Za tohoto předpokladu je možno vyjádřit součinitel tepelné vodivosti buď v závislosti na pórovitosti anebo na objemové hmotnosti. Jelikož se objemová hmotnost zjišťuje snadněji než pórovitost, uplatňuje se častěji.



Obrázek 11. Průběh hodnot součinitele tepelné vodivosti škvárobetonu v závislosti na objemové hmotnosti<sup>19</sup>

Z obrázku 11 je patrné, že součinitel tepelné vodivosti je tím větší, čím je vyšší hodnota objemové hmotnosti. Toto pravidlo však obecně neplatí pro všechny materiály za všech okolností.



Obrázek 12. Součinitel tepelné vodivosti minerální vlny v závislosti na objemové hmotnosti<sup>20</sup>

(M – nejnižší hodnota součinitele tepelné vodivosti).

Obrázek 12 znázorňuje dva rozdílné úseky, které rozdělují bod M, tedy bod s nejnižší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

<sup>19</sup> ŘEHÁNEK, J. a kol.: Tepelně technické a energetické vlastnosti budov, Praha, Grada, 2002

V pravém úseku křivky odpovídá průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti dle pravidla – tepelná vodivost vzrůstá, zvětšuje-li se objemová hmotnost materiálu. v levém úseku téže křivky je závislost opačná.

Tato okolnost je vysvětlena tím, že z hlediska šíření tepla ve vzduchových dutinách není důležitá pouze celková pórovitost, ale také velikost, tvar a rozmístění dutin v materiálu. v pórovitých materiálech se teplo šíří nejen vedením, ale i sáláním a za jistých podmínek i prouděním. Výsledný součinitel tepelné vodivosti suchého pórovitého materiálu je pak dán vztahem:

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_k + \lambda_s,$$

kde  $\lambda$  je výsledný součinitel tepelné vodivosti,  
 $\lambda_v$  je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla vedením,  
 $\lambda_k$  je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla prouděním,  
 $\lambda_s$  je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla sáláním.

Veličina  $\lambda$  vyjádřená vztahem  $\lambda = \lambda_v + \lambda_k + \lambda_s$  by se měla nazývat jinak než tepelná vodivost nebo součinitel tepelné vodivosti, např. součinitel šíření tepla.

V praxi se však uchoval termín tepelná vodivost bez ohledu na to, které druhy šíření tepla se vedle vedení podílejí na celkovém šíření tepla v pórovitém materiálu. Tento terminologický problém má historické kořeny.

Šíření tepla materiály se zjišťuje experimentálním způsobem a vyhodnocení výsledků měření se provádí podle rovnice vedení tepla, takže i výsledek se označuje jako tepelná vodivost. z toho ovšem vyplývá důležitý závěr: k hodnotám tepelné vodivosti materiálu zjištěných měření a vyhodnocených dle rovnice vedení tepla musí být připojeny všechny další dílčí určující parametry, při kterých byly hodnoty stanoveny a které způsobují vždy určité riziko nepřesnosti.

#### 4.2.1.2 Vliv teploty a vlhkosti na tepelnou vodivost

Tepelná vodivost stavebních materiálů se zvětšuje, roste-li jejich teplota. Způsobuje to intenzivnější šíření tepla vedením v pevných částicích materiálu a šíření tepla prouděním a sáláním v pórech materiálu.

S dostatečnou přesností lze závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě vyjádřit lineárním vztahem:

$$\lambda = \lambda_0[1 + b(t - t_0)]$$

kde  $\lambda_0$  je součinitel tepelné vodivosti při teplotě  $t_0$  (obvykle laboratorní teplota do 30 °C),  
 $b$  je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s teplotou materiálu,  
Tento vztah byl modifikován pro jednoduché zjištění závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti a teplotě sledovaného materiálu. Lze ho přijmout jako lineární nárůst s vlhkostí i teplotou a je tedy možno vyjádřit jej rovnicí:

$$\lambda = \lambda_0[1 + w * \alpha_w + b(t - t_0)]$$

kde  $\lambda_0$  je součinitel tepelné vodivosti při teplotě  $t_0$  (obvykle laboratorní teplota do 30 °C),  
 $b$  je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s teplotou materiálu,  
 $\alpha_w$  je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s vlhkostí materiálu,  
 $w$  je hmotností vlhkost udaná v %

Vlhkost je ve stavebních materiálech obsažena v různých formách, rozhodující je přitom způsob vazby vlhkosti s materiálem.

1. Chemická vazba: Je součástí strukturní mřížky materiálu, do které se dostává při chemických reakcích a krystalizaci. Vyznačuje se vysokou energetickou úrovní molekulární vazby s materiálem. Za normálních podmínek se ze stavebních konstrukcí nevysuší.
2. Fyzikálně chemická vazba: Vzniká při adsorpci vlhkosti na povrchu póru a kapilár, ani tato vlhkost se nevysuší za normálních klimatických podmínek.
3. Fyzikálně mechanická vazba: Udržuje se v pórech a kapilárách v důsledku kapilárního tlaku a smáčivosti hydrofilních materiálů, tento druh vlhkosti se vypařuje z konstrukcí poměrně snadno za normálních klimatických podmínek.

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost, za teplotních podmínek, kterým jsou stavební materiály vystaveny, se projevuje tak, že roste-li vlhkost materiálu, zvyšuje se i jeho hodnota součinitele tepelné vodivosti. To se zdůvodňuje obecně dvěma příčinami.

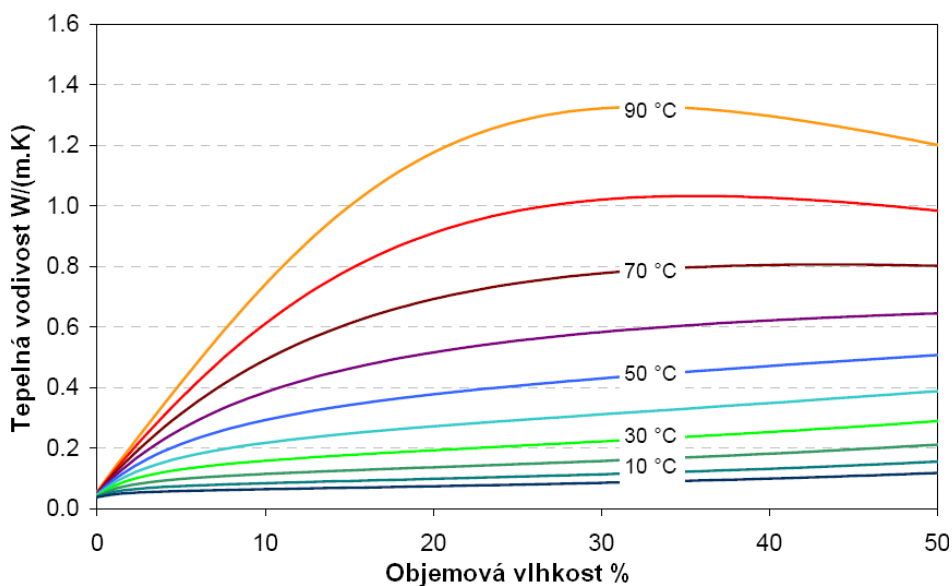
První vychází z faktu, že voda v pórech materiálu, která je zde místo vzduchu, má tepelnou vodivost zhruba 25krát větší než vzduch. Druhá příčina má oporu ve skutečnosti, že při působení rozdílu teplot ve vlhkém materiálu, vzniká vedle tepla vedením, prouděním a sáláním také přenos tepla proudící vlhkostí.

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost materiálu může být ještě mnohem výraznější, jestliže se změní voda v led. Je to z důvodu, že hodnota součinitele tepelné vodivosti ledu je zhruba 2.2 W/mK. Problém je však stanovit teplotu, při které se mění voda v led v pórech materiálu. z experimentálních výsledků je známo, že tato přeměna nastává při teplotách nižších, než je bod mrazu volné vody (0 °C). Platí ale, že čím jsou póry materiálu menší, tím je nižší teplota, při které se změní voda v led. Například voda v pórech 3,2 μm zamrzla při teplotě -4 °C a v pórech o 1,4 μm při teplotě -17 °C.<sup>20</sup>

Tabulka 4. Průběh hodnot součinitele tepelné vodivosti v závislosti na hmotnostní vlhkosti a objemové hmotnosti.<sup>20</sup>

$\rho_s$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] při $u_m$ [%]					
	0	5	10	15	20	25
400	0,116	0,137	0,157	1,78	0,198	0,219
500	0,145	0,171	0,197	0,222	0,274	0,272
600	0,169	0,198	0,223	0,257	0,286	0,316
700	0,204	0,240	0,274	0,311	0,347	0,381
800	0,238	0,280	0,322	0,364	0,405	0,447
900	0,279	0,328	0,377	0,426	0,475	0,52

<sup>20</sup> HORÁK, Z.: Praktická fyzika. SNTL, Praha 1968

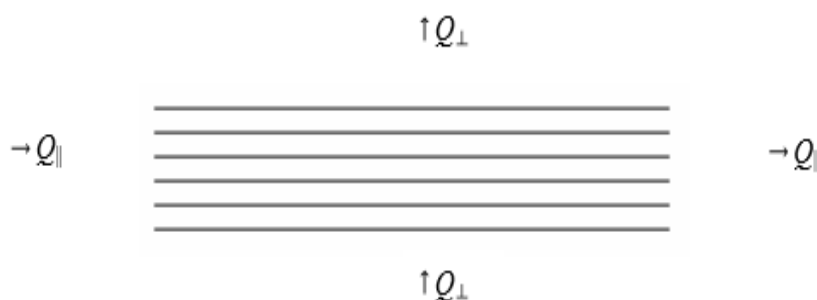


Obrázek 1. Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na objemové vlhkosti a teplotě materiálu.<sup>2</sup>

#### 4.2.1.3 Vliv směru tepelného toku na tepelnou vodivost

Vliv směru tepelného toku se projevuje u neizotropních materiálů, tj. materiály, které se vyznačují různými vlastnostmi v různých směrech. Typickým představitelem neizotropního materiálu je například materiál z minerálních vláken. Model struktury takového materiálu můžeme vidět na obrázku 13.

Rovnoběžné uspořádání vláken, jejichž délka je mnohonásobně větší než jejich tloušťka, vytváří vzduchové dutiny s malou tloušťkou kolmo na vlákna a s velkou tloušťkou vzduchové dutiny rovnoběžně s vlákny.<sup>21</sup>



Obrázek 13. Model struktury neizotropního materiálu<sup>21</sup>

Zvětšuje-li se velikost pórů (vzduchových dutin), roste i hodnota tepelné vodivosti vzduchu v této dutině.

<sup>21</sup> ZACH, HROUDOVÁ, Možnosti stanovení součinitele tepelné vodivosti u keramických zdicích tvarovek. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014, GRANT journal ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4

Z toho plyne fakt, že je-li směr tepelného toku rovnoběžný s vlákny, tj. ve směru vzduchových dutin s velkou tloušťkou, pak je jeho hodnota větší, než proudí-li kolmo na vlákna, kolmo na vzduchové dutiny s malou tloušťkou. u tepelné vodivosti to znamená, že tepelná vodivost materiálu ve směru kolmém na vlákna je menší než tepelná vodivost ve směru rovnoběžném s vlákny.

Vláknité materiály, zvláště ty z minerální vlny, patří k tzv. měkkým nebo polotuhým materiálům. Může se tedy měnit, vlivem stlačení, objemová hmotnost a tím také pórovitost. Dochází přitom ke změně celkové pórovitosti a také ke změně dutin mezi vlákny. To má za následek změnu tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti.

U vláknitých materiálů má vliv na tepelnou vodivost také tloušťka vláken. Například skleněná vlákna při tloušťce vláken 15,5  $\mu\text{m}$  mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti 0,041  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a při tloušťce 35,2  $\mu\text{m}$  hodnotu 0,045  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Dále u minerální vlny působí nepříznivě na tepelnou vodivost také množství nerozvlákněného materiálu, který zvyšuje jeho tepelnou vodivost.

#### 4.2.1.4 Vliv struktury materiálu na tepelnou vodivost

Vliv struktury na tepelnou vodivost je vidět v tabulce K. Jsou zde hodnoty součinitele tepelné vodivosti různých pevných částic skeletu pórovitého materiálu. z porovnání největší a nejmenší hodnoty v tabulce vyplývá, že se odlišují přibližně 17krát. Ve skutečnosti ale nejsou rozdíly v hodnotách tak rapidní, jak ukazují uvedené hodnoty.

Je to z důvodu, že šíření tepla vedením tvoří pouze malou část z celkového toku proudícího pórovitým materiálem.<sup>20</sup>

Tabulka 5. Součinitel tepelné vodivosti různých pevných částí skeletu pórovitého materiálu<sup>21</sup>

Materiál	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Vápenec	0,43 – 0,88
Mramor	2,99
Rula	3,86
Křemen	7,44

Některé stavební a tepelně izolační materiály jsou složeny z materiálů s různou tepelnou vodivostí. Obecně pak platí, že výsledná tepelná vodivost je tím větší, čím je větší tepelná vodivost jednotlivých složek daného materiálu.

Chemické složení má rovněž vliv na tepelnou vodivost. Uvádí se, že materiály zásaditého charakteru jsou lepšími vodiči tepla než materiály kyselého charakteru.

#### 4.2.1.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti lze hned několika způsoby, které se od sebe liší teplotním stavem a dále způsobem stanovení a vyhodnocení tepelné vodivosti zkušební vzorku. Obecně se metody dělí na stacionární a nestacionární.

Stacionární metody vycházejí ze vztahu  $Q \cdot d$ , kdy je nutno zajistit ustálený tepelný tok procházející od teplejšího povrchu měřeného vzorku k jeho chladnějšímu povrchu. Pak lze z rozdílu teplot, průřezu a tloušťky vzorku vypočítat jeho součinitel tepelné vodivosti. Mezi stacionární metody se řadí metoda chráněné teplé desky, metoda válce, metoda koule a metoda elipsoidu.

Nestacionární měření je založeno na sledování dynamického vývoje teplot. Tyto metody nevyžadují ustálený teplotní stav, sledují průběh šíření teplotní vlny měřeným vzorkem.

Na základě různého způsobu sledování nestacionárního vývoje během měření pak rozlišujeme metodu nestacionárního tepelného toku a metodu tepelných impulsů (metoda horkého drátu – *Hot Wire Method*, záblesková metoda *Laser Flash Method*).

Nestacionární metody lze též dělit z hlediska časové závislosti výkonu tepelného zdroje na metody s impulsním tepelným zdrojem, s kontinuálním tepelným zdrojem a s periodickým tepelným zdrojem.<sup>16, 17, 20</sup>

#### 4.2.2 Tepelná kapacita

Měrné teplo  $c$  neboli měrná tepelná kapacita, je definována jako množství tepla  $Q$  v Joulech, které je potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň.

Teplo potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti  $m$  o teplotu  $\Delta t$  lze vypočítat ze vztahu:

$$Q = mc\Delta t$$

kde  $\Delta t = t_2 - t_1$  je rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotou.

Hodnota měrné tepelné kapacity je mírně závislá na teplotě, a proto se pro větší teplotní intervaly uvádí střední měrná tepelná kapacita  $c$ .

K určování hodnot měrného tepla se využívá kalorimetrická rovnice.

U plynů se rozlišuje měrná tepelná kapacita při stálém tlaku ( $c_p$ ) a při stálém objemu ( $c_v$ ).

Vztah mezi těmito měrnými tepelnými kapacitami udává Poissonova konstanta a Mayerův vztah.<sup>22</sup>

Tabulka 6. Hodnoty měrné tepelné kapacity různých materiálů<sup>20</sup>

Látka	$c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Voda	4180
Vzduch (0 °C)	1003
Led	2430
Olej	2000
Zlato	129
Absolutně suché dřevo	1450

Nejsou-li známé hodnoty měrné tepelné kapacity, je možno použít orientační hodnoty:

$$c = 1880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad \text{pro materiály organického přirozeného původu}$$

$$c = 1250 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad \text{pro materiály organického umělého původu a smíšené anorganicko-organického původu}$$

$$c = 840 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad \text{pro materiály anorganického původu}$$

Z hlediska tepelné techniky je důležitá znalost závislosti měrné tepelné kapacity na vlhkosti. Stanovuje se experimentálně.<sup>22</sup>

Tabulka 7. Měrná tepelná kapacita škvárobetonu v závislosti na hmotnosti vlhkosti.<sup>21</sup>

$u_m$ [%]	0	5	10	15	20
$c$ [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,808	0,963	1,097	1,214	1,310

Platí obecný vzorec:

$$c = \frac{c_s + 42u_m}{1 + 0,01u_m}$$

kde  $c$  je výsledná hodnota,

$c_s$  je měrná tepelná kapacita v suchém stavu,

$u_m$  je hmotností vlhkost.

### 4.2.3 Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti udává, jak rychle se vyrovná teplotní rozdíl na dvou protilehlých stěnách krychle o hraně 1 m a je definován jako poměr tepelné vodivosti k měrnému teplu vztaženému na jednotku objemu a platí zde vztah:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

Teplotní vodivost se zjistí buď výpočtem z tepelné vodivosti, měrného tepla, měrné hmotnosti anebo na Pykově-Stahlanově přístroji. Podstatou této metody je zjištění doby, za kterou se projeví určitá teplota (50 °C) na horní ploše zkušební destičky, položené na hladinu rtuťové lázně o teplotě 100 °C. Zkušební tělesa mají v průměru 50 mm a tloušťku v rozmezí od 7 do 10 mm. Stěny těles musí být hladké a rovnoběžné. Měření teploty se provádí pomocí termočlánku. Destička opatřená termočlánkem se položí na hladinu rtuti a zjistí se čas, za který teplota odvrácené plochy zkušebního tělesa dosáhne 50 °C.

Okamžik, kdy teplota dosáhne této hodnoty se měří pomocí krystalu difenilaminu, protože ten má dobře definovaný bod tání (54 °C). Pokud není stanoveno jinak, měří se 3 destičky téže látky.<sup>22</sup>

Teplotní vodivost se pak vypočte dle vzorce:

$$a = C \frac{d}{\tau},$$

kde  $C$  je konstanta přístroje.

Teplotní vodivost se stanoví nejméně pětkrát a vypočte se průměr, který je pak střední teplotní vodivostí zkoušené látky v rozmezí od 20 °C do 100 °C.

Konstanta přístroje  $C$  se pak určí pokusem se zkušební destičkou z nerostné látky, jejíž střední teplotní vodivost je známá (například sklo),

Podle novější metody se součinitel teplotní vodivosti stanovuje tzv. metodou a-kalorimetru v regulárním režimu 1. druhu.

Zkušební těleso vytemperované na určitou teplotu se přemístí do temperační lázně o jiné teplotě (měrné temperační lázně) a vyhodnocuje se průběh změny teploty středu tělesa.

---

<sup>22</sup> ONDRÁŠ, J.: Nestacionární metody měření tepelné vodivosti. Diplomová práce, fakulta technologická, VUT Brno, Gottwaldov 1983

Po dosažení poloviny celkové změny je možné považovat algoritmus rozdílu teploty okamžité a ustálené na konci pokusu za lineární funkci času. Toto stádium označujeme za regulární stav I. druhu.

Po provedení zkoušky je nutné mít určité přístrojové vybavení, přičemž jsou potřeba dva kapalinové termostaty, diferenciální termočlánek, jehož jeden spoj je ve středu zkušební tělesa a druhý v měrné temperanční lázni. Tento druhý kontakt je obvykle zhotoven z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí. Tímto materiálem může být například železo nebo konstantan. Dalším nutným přístrojem je lineární zapisovač s možností lineárního posuvu registračního papíru a mikrometr.

Při zkoušce se zkušební těleso vloží, včetně termočlátku, do termostatu pro vytemperování před měřením do ustálené teploty. Pak zkušební těleso přeneseme co možná nejrychleji do měrné temperanční lázně a současně se zapne registrace spuštěním posuvu registračního papíru zapisovače. Zápis se ukončí po vyrovnání teplot zkušební tělesa a měrné temperanční lázně, kterému odpovídá minimální výchylka zapisovače.

Hodnoty výchylky zapisovače se udává v libovolných jednotkách. Ze záznamu se odečte hodnota  $x_0$ , odpovídající ustálenému teplotnímu stavu na konci pokusu a také  $x_\tau$  příslušící časům  $\tau$ . z těchto hodnot se stanoví regresní analýzou směrnice  $b$  ( $s^{-1}$ ) přímkové závislosti dané vztahem:

$$\log(x_\tau - x_0) = u + b \cdot \tau$$

Teplotní vodivost se pak stanoví ze směrnice a konstanty  $K_2$  závislé na tvaru a rozměrech zkušební tělesa.

$$a = K_2 \cdot b$$

Měření touto metodou se provádí za předpokladu, že teplotní vodivost hodnoceného materiálu, je ve zvoleném rozsahu teplot konstantní. Stanovení teplotní vodivosti touto metodou nelze provést při velkých odchylkách od tohoto předpokladu (například při teplotách blízcí se bodu tání). v oblastech, kde je teplotní závislost značně výrazná, je vhodné volit menší teplotní interval mezi lázněmi.<sup>22</sup>

#### 4.2.4 Tepelná jímavost

Tepelná jímavost  $b$  je dána vztahem:

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho$$

Kde  $b$  je tepelná jímavost [ $(\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})^2$ ],  
 $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $c$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $\rho$  je objemová hmotnost materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Tepelná jímavost je veličina, která se používá v tepelné technice pro hodnocení vlivu dvou dotýkajících se materiálů (těles), tj. vlivu na tzv. dotykovou (kontaktní) teplotu. Je to veličina, která se uplatňuje zejména při navrhování a hodnocení podlahových konstrukcí.

Tepelná jímavost, podobně jako tepelná vodivost, závisí na všech činitelích ovlivňujících tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost.<sup>20</sup>

## 5 Mikrovlnné záření

Počátky využívání mikrovlnného záření sahají do první poloviny 20. století, ačkoli jeho existenci předpověděl již v roce 1865 James Clerk Maxwell<sup>23</sup>. Mezi prvními popsal princip oscilace magnetronu v roce 1924 profesor Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze August Žáček, v zahraničním časopise byl jeho objev publikován v roce 1928 a od té doby je považován za vynálezce magnetron.<sup>24</sup> Teprve na konci války a po ní se začalo vážněji hovořit o mikrovlnném ohřevu a jednou z nejdůležitějších osobností, které se na něm podílely, byl Percy L. Spencer, který se zabýval spotřebitelskými a komerčními mikrovlnnými troubami. Svůj první patent na mikrovlnný ohřev potravin podal v říjnu 1945. Jeho spolupracovníci popisují tento objev jako postupný proces pokusů a omylů, kdy se prováděly experimenty, při nichž například praskala kukuřice nebo vybuchovala vejce. Percy Spencer pracoval pro společnost Raytheon, kde se soustředil především na vynález mikrovlnné trouby, ale i další společnosti se zabývaly výzkumem mikrovlnného záření, jen se více soustředily na průmyslové aplikace; například v roce 1947 byl publikován článek, který se zabýval urychlováním procesů pomocí mikrovln.<sup>25</sup> Později, v 60. a 70. letech, pokročil vývoj mikrovlnné technologie natolik, že se začaly objevovat první mikrovlnné trouby pro domácnosti. Dnes má mikrovlnnou troubu téměř každá domácnost a princip mikrovlnného ohřevu se používá i v mnoha dalších odvětvích mimo potravinářství<sup>26</sup>. Široké uplatnění našel například v lékařství<sup>27</sup>, ve zmíněném potravinářském průmyslu<sup>28</sup>, v armádě<sup>29</sup> a také ve stavebnictví<sup>30</sup>.

V tomto odvětví již byla provedena řada studií, které potvrdily možnost využití mikrovln pro sušení stavebních materiálů<sup>31,32,33,34</sup>.

---

<sup>23</sup> Maxwell, J.C. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* **1865**, 155, 459–512

<sup>24</sup> The 70th birthday of Prof. Dr. August Žáček. *Czech J. Phys.* **1956**, 6, 204–205.

<sup>25</sup> Kinn, T.P.; Marcum, J. Possible Uses of Microwaves for Industrial Heating. *Prod. Eng.* **1947**, 18, 137–140.

<sup>26</sup> Osepchuk, J.M. A History of Microwave Heating Applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **1984**, 32, 1200–1224.

<sup>27</sup> Gartshore, A.; Kidd, M.; Joshi, L.T. Applications of Microwave Energy in Medicine. *Biosensors* **2021**, 11, 96.

<sup>28</sup> Guzik, P.; Kulawik, P.; Zajac, M.; Migdał, W. Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, 62, 7989–8008.

<sup>29</sup> Hoehn, J.R. Defense Primer: Military Use of the Electromagnetic Spectrum. Library of Congress. Congressional Research Service 2022, Report IF11155, Version 15. Available online: <https://crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=IF11155>

<sup>30</sup> Procházka, M.; Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Novotný, M. Microwave radiation and its application on construction materials. *Eng. Struct. Tech.* **2016**, 8, 150–156.

<sup>31</sup> Makul, N. Effect of low-pressure microwave-accelerated curing on the drying shrinkage and water permeability of Portland cement pastes. *Elsevier* **2020**, 13, e00358.

<sup>32</sup> Kvapilova, V. Evaluation of microwave drying effects on historical brickwork and modern building materials. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, 867, 012026.

<sup>33</sup> Kvapilova, V.; Suhajda, K. Possibility of Using Microwave Radiation for Rehabilitation of Historical Masonry Constructions. *Key Eng. Mat.* **2020**, 868, 119–126.

<sup>34</sup> Tauhiduzzaman, M.; Hafez, I.; Bousfield, D.; Tajvidi, M. Modeling Microwave Heating and Drying of Lignocellulosic Foams through Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Analysis. *Processes* **2021**, 9, 2001.

Mikrovlny jsou součástí elektromagnetického záření s frekvencí mezi 300 MHz a 300 GHz, což odpovídá vlnové délce mezi 1 m a 1 mm. Pro průmyslové účely jsou povoleny vyšší frekvence, ale ve stavebnictví byla celosvětově používaná frekvence 2,45 GHz s odpovídající vlnovou délkou 12,2 cm.

Mikrovlny patří do širokého spektra elektromagnetických vln, které zahrnuje také například oblast viditelného světla. Jejich chování popisují Maxwellovy rovnice. Platí pro ně, že vektory charakterizující magnetické a elektrické pole jsou v každém bodě a v každém okamžiku k sobě kolmé a oba jsou kolmé ke směru pohybu vlny. Jejich amplitudy mají konstantní poměr a ve vakuu se elektromagnetické vlny pohybují rychlostí světla, takže platí vztah:

$$c = l \cdot f$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu,

$l$  je vlnová délka,

$f$  je vlnová frekvence<sup>29, 35</sup>.

Mikrovlenné záření způsobuje ohřev a molekuly se v elektrickém poli orientují podle své polarizace. Při kontaktu mikrovlenného záření s molekulami vody dochází k transformaci elektromagnetické energie a ohřevu. Následuje ohřev stavebních materiálů.<sup>28</sup>

Mikrovlny spadají do oblasti elektromagnetických vln s nižší frekvencí než sluneční záření, takže nezanechávají žádné zbytkové záření, které by bylo zdraví škodlivé. Používání mikrovlenných zařízení je zcela bezpečné a k jakémukoli poškození zdraví může dojít pouze při přímém ozáření z několika cm po dobu alespoň několika minut, ať už provedeném úmyslně, nebo nesprávnou manipulací se zařízením.<sup>29</sup>

Největší riziko pro lidské zdraví představuje příliš silné mikrovlenné záření. Používání mikrovlenných zařízení se zářiči vyzařujícími takové elektromagnetické záření venku představuje vážné nebezpečí pro osoby v oblasti s vysokou hustotou mikrovlenné energie. Povolené úrovně intenzity elektromagnetického pole v pásmu 2,45 GHz jsou stanoveny předpisy EU, včetně směrnice 2004/40/ES a doporučení 1999/510/ES, a také předpisy pro jednotlivé země. Předpisy obvykle stanovují přípustnou intenzitu elektromagnetického pole (od  $7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  do  $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ) nebo hustotu ve wattch (od  $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  do  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

---

<sup>35</sup> Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Jiroušek, Z. Microwave Theory in Construction Practice. TZB-Info 2017. Available online: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/15568-mikrovlenna-teorie-ve-stavebni-praxi>

Základní teorie elektromagnetického pole byla založena na řadě fyzikálních zákonů vycházejících z experimentů a poznatků spojených se jmény jako Coulomb, Savart, Ampere a Faraday. Pro rozvoj teorie měly zásadní význam Faradayovy práce, zejména objev elektromagnetické indukce, a práce Maxwella, který po objevu pojmu výtlačného proudu vypracoval model elektromagnetického pole.<sup>36</sup>

Obecné elektromagnetické pole, ať už přírodní nebo vytvořené člověkem, je nestacionární (existuje v něm stálá časová proměnlivost). Proměnlivost pole lze často považovat za okrajovou nebo pomalou. Po tomto zjednodušení lze pole rozdělit na čtyři typy: (a) statické pole, kde se všechny náboje považují za klidové; (b) stacionární pole generované náboji, které tvoří stacionární proudy; (c) kvazistacionární pole, které je zjednodušením obecného nestacionárního pole, protože se zde nezohledňuje tzv. posunový proud proti volným proudům elektronů; a (d) nestacionární pole, tj. obecné elektromagnetické pole<sup>34</sup>.

Ve stavebnictví existuje mnoho aplikací mikrovlnné energie. Používá se k vysoušení stavebních materiálů a konstrukcí<sup>1</sup>, k urychlení tuhnutí směsí<sup>37</sup>, ke sterilizaci biotických škůdců<sup>38</sup>, nebo dokonce k měření vlhkosti.<sup>39</sup>

Zahřívání materiál je vystaven vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli, které způsobuje polarizaci molekul, vodivost a magnetické procesy. Vnitřní energie molekul se postupně zvyšuje, což způsobuje zahřívání materiálu. Při dokonalém mikrovlnném ohřevu je rozložení intenzity mikrovlnného pole v dané oblasti zcela rovnoměrné a teplo vzniká rovnoměrně v celém objemu materiálu, ale v reálné situaci tomu tak není.

Přítomnost vln závisí na konstrukci použitého zařízení a na typu materiálu uvnitř ohřívací komory. Množství absorbované energie se liší podle velikosti, tvaru, dielektrické konstanty a permitivity materiálu. Kromě těchto vlastností samotného zahřívání objektu jsou důležité zejména frekvence a intenzita elektromagnetického pole. Teplo vzniklé v předmětech se šíří do okolí přenosem tepla. Působí-li mikrovlnná energie na materiál příliš dlouho, může dojít k přehřátí a poškození objektu.<sup>27</sup>

Jednou z výhod mikrovlnného záření je selektivní ohřev. Složky byly zahřívány podle své schopnosti absorbovat elektromagnetickou energii, proto byla zahřívána především ta nejvíce absorbující, což je obvykle volně vázaná voda. Tato složka pak ohřívá ostatní

---

<sup>36</sup> Novotný, M.; Šuhajda, K.; Sobotka, J.; Gintar, J.; Dová, E.S.; Mádl, M.; Jiroušek, Z. Use of microwave radiation in building industry through application of wood element drying. *Wood Res.* **2014**, 59, 389–400

<sup>37</sup> Průša, D.; Šťastník, S.; Šuhajda, K. The possibilities of using microwave radiation to accelerate the solidification of mixtures consisting of a polymer matrix binder and a waste thermal insulation filler. *AIP Conf. Proc.* **2022**, 2488, 020023.

<sup>38</sup> Novotný, M.; Škramlík, J.; Šuhajda, K.; Tichomirov, V. Sterilization of Biotic Pests by Microwave Radiation. *Procedia Eng.* **2013**, 57, 1094–1099.

<sup>39</sup> Kääriäinen, H.; Rudolph, M.; Schaurich, D.; Tulla, K.; Wiggenhauser, H. Moisture measurements in building materials with microwaves. *NDT E Int.* **2001**, 34, 389–394.

materiálové složky, což vede k důkladnějšímu ohřevu objektu. Mikrovlnná energie dokáže materiál ohřát účinněji než běžný ohřev z povrchu. Využívala se pro sušení různých materiálů a urychlení tvrdnutí směsí. Mezi nevýhody této metody patří vyšší spotřeba energie, možné změny mechanických vlastností předmětu a možné lokální přehřátí v důsledku nestejnomyšernosti mikrovlnného pole a nehomogenity ohřívaného materiálu. v neposlední řadě je zde také požadavek na odbornou způsobilost při práci s EMW zářením.<sup>27, 30</sup>

Proces mikrovlnného sušení/tvrdnutí lze rozdělit do čtyř fází. První z nich je vlastní ohřev molekul vody ve spojení se sekundárním ohřevem materiálu. Druhá fáze spočívá v odpařování vody obsažené v povrchové vrstvě materiálu. Během třetí fáze se objem vody zvětšuje v důsledku jejího zahřívání. To způsobuje zvýšení tlaku, který se šíří všemi směry, včetně povrchu materiálu, a nutí ohřátou vodu k vytlačení na povrch. Poslední fází je postupné ochlazování. Voda na povrchu materiálu se průběžně odpařuje. Rozdíl v obsahu vlhkosti na povrchu a v hloubce materiálu má za následek rozdíl v parciálním tlaku, který umožňuje transport vlhkosti k povrchu. Odpařování vlhkosti z povrchu sušícího se materiálu vyžaduje značné množství tepla. v důsledku toho se povrch materiálu a okolní vzduch ochlazují.<sup>27</sup>

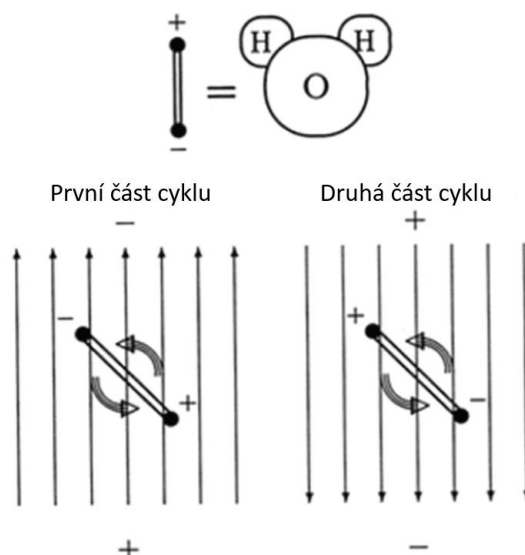
Rychlost sušení ovlivňují následující faktory: teplotní gradient, obsah vlhkosti v povrchové vrstvě, relativní vlhkost okolí sušícího se materiálu, schopnost materiálu rozvádět vodu ze svého jádra na povrch, povrchová úprava sušeného materiálu a tepelná vodivost sušícího se materiálu.<sup>27, 30</sup>

Mikrovlny se můžou šířit v různých médiích, samozřejmě s nižší rychlostí než ve vakuu. Ve vzduchu je tento rozdíl malý, jiná je situace ve vodě, kde se mikrovlny šíří 9krát nižší rychlostí, a v důsledku toho se i vlnová délka devětkrát zkrátí na 1,36 cm. Při přechodu mikrovln z jednoho prostředí do druhého dochází na rozhraní k odrazovým a lomovým jevům stejně jako u světla. v podstatě jde o kombinaci tří případů – část energie mikrovln se od povrchu odráží, část v látce absorbuje nebo materiálem prochází.

Při absorpci mikrovln v materiálu se snižuje amplituda vlny. Míra absorpce je charakterizována pomocí penetrační hloubky, což je vzdálenost, kterou mikrovlnné záření v materiálu musí projít, aby jeho intenzita klesla na 13,53 % původní hodnoty.

Pokud použijeme k popisu mikrovln de Broglieho vztah, zjistíme, že na ně lze pohlížet také jako na částice s energií 0,00001 eV, což je energie velmi malá a nestačí ani k rozbití nejslabší chemické vazby. Odtud tedy schopnost mikrovln ohřívát neplatí. Pro ohřev se využívá jevu, kdy permanentní dipóly se v stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nejpříjemnější polohy.

Pokud dojde k přeplování pole, snaží se molekuly nesoucí náboj opět otočit do nejvhodnější pozice. Snaha vyrovnat se s měnícím se elektrickým polem mikrovln vede k rotačnímu pohybu, při němž dochází ke kolizím a tření se sousedními molekulami a ke vzniku tepla. Nejběžnější molekulou, jejíž permanentní dipólový moment vede k její rotaci při ozařování mikrovlnami je voda, která je zároveň ve značném množství přítomna v biologických materiálech a způsobuje tak jejich ohřev v mikrovlnné troubě.<sup>21, 22, 26</sup>



Obrázek 14. Schéma molekuly vody se silovým účinkem pole mikrovlnné energie<sup>25, 26</sup>

Ohřívání materiálů se vkládá do vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, kde dochází k polarizaci molekul, vodivostním mechanismům a k magnetickým efektům uvnitř materiálů. Zvyšuje se vnitřní energie molekul a tím se materiál postupně ohřívá.

Při dokonalém mikrovlnném ohřevu je rozložení intenzity mikrovlnného pole zcela rovnoměrné v celé ohřívací oblasti a teplo vzniká stejnoměrně v celém objemu materiálu. Výskyt vlnění je závislý na konstrukci zařízení a na materiálech uvnitř ohřívací komory. Míra absorbovaného výkonu závisí na velikosti, tvaru, na dielektrické konstantě a permitivitě látky. Kromě samotného předmětu je důležitá zejména frekvence a intenzita elektromagnetického pole. u řady materiálů je poměrná permitivita závislá také na teplotě i na frekvenci, ale u většiny materiálů narůstá permitivita s frekvencí. Teplo, které se v ohříváních objektech generuje, se prostupem tepla šíří do okolí.

Pokud ponecháme mikrovlnnou energii na materiál působit příliš dlouho, může dojít k přehřátí či poškození ohříváního předmětu.

Mikrovlnná energie se využívá v mnoha odvětvích lidské činnosti; nejen k ohřevu potravin, ale i například k vysoušení knih či tkanin, restaurování uměleckých děl, tavení skla a v mnoha dalších technologiích.<sup>21, 26</sup>

Mezi výhody mikrovlnného záření patří zejména tzv. selektivní ohřev. Ohřívá se pouze složka, která absorbuje větší množství elektromagnetické energie (většinou se jedná o volně vázanou vodu). Takto se zajistí ohřátí vrstvy materiálu do větší hloubky od povrchu. Tato ohřátá složka pak dále ohřívá další části materiálu.

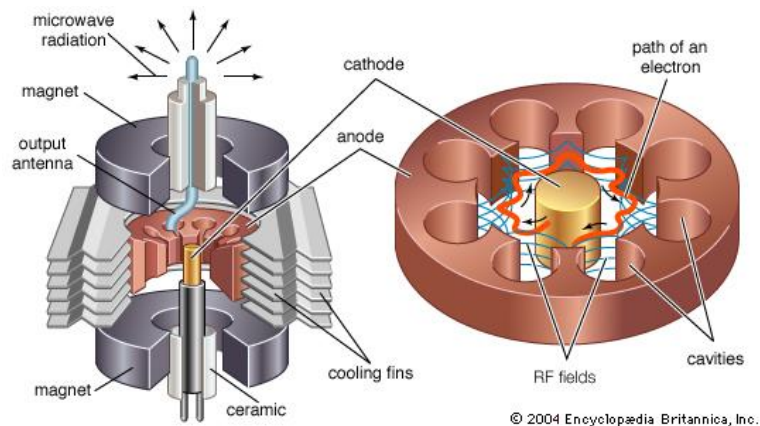
Mikrovlnami lze prohřát materiál účinněji než pouhým ohřevem od povrchu, proto se této techniky používá k vysoušení různých materiálů. s tím souvisí i případné urychlení vytvrzení čerstvých pojivových směsí, jak je popsáno v tomto příspěvku dále. Optimální výkon zdroje mikrovlnného záření a dobu, po kterou bude působit tak, aby co nejméně mikrovlnný výkon poškodil krystalovou mřížku pojivové složky směsi.

Nevýhodou je již zmíněná vyšší energetická náročnost, v případě cementových kompozitních materiálů pak jiné mechanické vlastnosti a možná lokální přehřátí v důsledku mikrovlnného pole i samotného materiálu. v neposlední řadě pak také požadavek na odbornou způsobilost s EMW zářením.<sup>22, 25, 26</sup>

## 5.1 Generátor mikrovlnného záření

Mikrovlnný generátor tvoří magnetron obsahující velmi silný prstencový permanentní magnet. Tento magnet obklopuje vakuovou trubicí s rezonančními dutinami. z jedné strany je na vakuovou trubicí připojena žhavicí katoda, z druhé vlnovod, kterým jsou vyprodukované mikrovlny odváděny. Na vyhřívanou střední katodu je přiváděno napětí v řádu několika voltů, na kovovou válcovou anodu opatřenou sudým počtem rezonančních dutin je přiváděno napětí v řádu kilovoltů. Ze žhavicí katody jsou emitovány elektrony.

Následný tok elektronů není ovládán mřížkou, ale vnějším magnetickým polem. Magnetické pole společně s působením rezonančních dutin uvádí elektrony do vysokofrekvenčních kmitů. z jedné z rezonančních dutin je vysokofrekvenční elektromagnetické záření odváděno výstupní anténou, která záření uvolňuje do vlnovodu nebo přímo do ohřívací komory. Dalšími částmi magnetronu je keramická zátka oddělující vlnovod a vakuum, chlazení, vysokonapěťová dioda, transformátor a kondenzátor.



Obrázek č. 15. Schéma uspořádání magnetronu<sup>22, 26</sup>

Mikrovlnný generátor tvoří magnetron obsahující velmi silný prstencový permanentní magnet. Tento magnet obklopuje vakuovou trubici s rezonančními dutinami. z jedné strany je na vakuovou trubici připojena žhavicí katoda, z druhé vlnovod, kterým jsou vyprodukované mikrovlny odváděny. Na vyhřívanou střední katodu je přiváděno napětí v řádu několika voltů, na kovovou válcovou anodu opatřenou sudým počtem rezonančních dutin je přiváděno napětí v řádu kilovoltů. Ze žhavicí katody jsou emitovány elektrony. Následný tok elektronů není ovládán mřížkou, ale vnějším magnetickým polem. Magnetické pole společně s působením rezonančních dutin uvádí elektrony do vysokofrekvenčních kmitů. z jedné z rezonančních dutin je vysokofrekvenční elektromagnetické záření odváděno výstupní anténou, která záření uvolňuje do vlnovodu nebo přímo do ohřívací komory.

Dalšími částmi magnetronu je keramická zátka oddělující vlnovod a vakuum, chlazení, vysokonapěťová dioda, transformátor a kondenzátor.

Takto se dá zajistit urychlení vytvrzení čerstvé směsi, nicméně je výsledek vykompenzován vysokou energetickou náročností. Zároveň je potřeba zajistit optimální výkon zdroje záření a dobu, po kterou bude působit tak, aby co nejméně poškodil krystalovou mřížku pojivové složky směsi.

Mechanismus přeměny mikrovlnné energie na teplo je dán vztahem:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon'' \cdot E^2,$$

kde  $P$  je energie absorbovaná v jednotce objemu,

$f$  je frekvence mikrovlnného pole,

$\varepsilon'$  je permitivita,

$\varepsilon''$  je dielektrický ztrátový faktor materiálu,

$E$  je intenzita el. pole uvnitř materiálu.<sup>25, 26</sup>

## 6 Odstranění vlhkosti ze stavebních materiálů pomocí EMW záření

Sanace vlhkého zdiva je proces, který má za cíl trvale snížit nadměrný obsah vlhkosti v konstrukcích, ať už jsou podzemní nebo nadzemní. Nadbytečná vlhkost ve stavebních konstrukcích může mít různé příčiny, protože voda může pronikat do stavebního materiálu různými způsoby, buď jako kapalina nebo vodní pára. Mezi hlavní příčiny nadměrné vlhkosti patří srážky, vztlínající voda, kondenzace vlhkosti, voda pod tlakem nebo pronikání vody do konstrukce v důsledku poruch v rozvodech instalací.

Důležité je si uvědomit, že po úspěšné sanaci vlhkého zdiva nelze očekávat okamžité snížení vlhkosti na nízké hodnoty. Místo toho dochází k postupnému snižování vlhkosti na novou nižší hodnotu, která závisí na vlastnostech stavebního materiálu, teplotě a vlhkosti vzduchu. Tuto hodnotu nazýváme hygroskopickou rovnovážnou vlhkostí. z praxe je známo, že například vysušení nově postavené cihlové budovy může trvat asi dva roky, a to platí i pro zdivo po sanaci vlhkosti. u stěn o větší tloušťce, například 1000 mm, může přirozené vysušení trvat přibližně 4-5 let.<sup>1</sup>

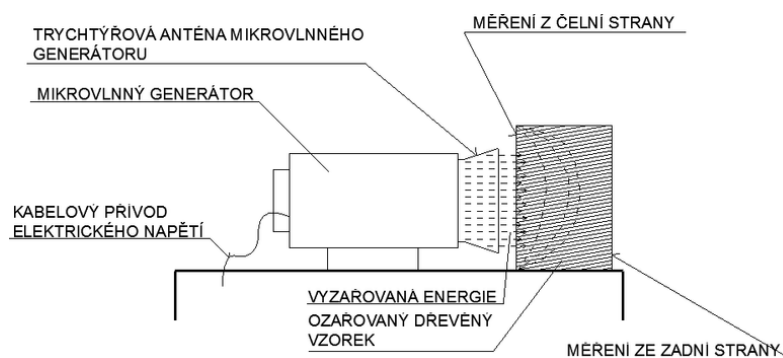
### 6.1 Teoretické základy mikrovlnného vysoušení

Mikrovlnné záření se šíří rychlostí světla od svého zdroje ve formě vln. Toto záření má sinusový průběh, což znamená, že jeho elektrické i magnetické složky se periodicky mění v čase. Délkou vlny a frekvencí tohoto mikrovlnného záření se určuje, jak často se tyto změny vlny opakují.

Přístroj pro mikrovlnné vysoušení zdiva se skládá z několika důležitých částí:

1. **Napájení:** Přístroj je napájen elektrickým proudem o standardních hodnotách napětí (220/380 V) a frekvenci (50 Hz). Toto napájení zajišťuje energii potřebnou pro generování mikrovlnného záření.
2. **Mikrovlnný generátor:** Tato část přístroje generuje samotné mikrovlnné záření. Mikrovlnný generátor vytváří elektromagnetické pole s mikrovlnnou frekvencí.
3. **Vlnovody:** Vlnovody jsou trubice nebo průchody, kterými se mikrovlnné záření přenáší od generátoru k místu, které má být vysušeno. Tyto vlnovody jsou navrženy tak, aby minimalizovaly únik záření.

4. **Magnetron s hlavicí:** Magnetron je součástka, která generuje samotné mikrovlnné záření. Hlavice magnetronu je umístěna v blízkosti místa, které má být vysušeno, a vysílá mikrovlny směrem k vysoušenému materiálu.
5. **Anténa:** Anténa je částí přístroje, která přenáší mikrovlnné záření z hlavice magnetronu směrem k vysoušenému materiálu. Existují různé typy antén, včetně příložných trychtýřových nebo tyčových zásuvných antén.<sup>1</sup>



Obrázek 16. Popis a terminologie mikrovlnného generátoru s příslušenstvím<sup>35, 40</sup>

Celkově má přístroj pro mikrovlnné vysoušení dřeva za úkol generovat, řídit a směřovat mikrovlnné záření na místo, které má být vysušeno. Mikrovlnný generátor a vlnovody zajišťují produkci a přenos mikrovlnného záření, zatímco anténa a magnetron se starají o směřování tohoto záření na vysoušený materiál.

Mikrovlny jsou generovány v přístroji přeměnou elektrické energie na mikrovlnnou energii. Tento generátor je obvykle vybaven vysokonapěťovými elektronkami a může být typu magnetron nebo klystron, a to v závislosti na frekvenci mikrovln. Tyto elektronky generují elektrické pole s mikrovlnnou frekvencí.

Mikrovlny, které jsou vytvořeny v generátoru, jsou přivedeny do vlnovodu, který je následně propojen s vnitřním prostorem antény. Konkrétní provedení a tvar antény závisí na způsobu využití mikrovln. v prostoru antény se mikrovlny odrazí od kovových plášťů a vytvářejí tak složité prostorové pole, které se mění v čase.

Když je materiál umístěn nebo přiložen do prostoru antény, mikrovlnné pole se deformuje v závislosti na vlastnostech tohoto materiálu a jeho objemu.

<sup>40</sup> OLOYEDE, A., GROOMBRIDGE, P., – The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood. Journal of Materials Processing Technology 100, Elsevier 2000.

Některé mikrovlny jsou absorbovány materiálem, což způsobuje přeměnu mikrovln na teplo. Některé mikrovlny jsou odraženy zpět, zatímco jiné mohou prostoupit materiálem.

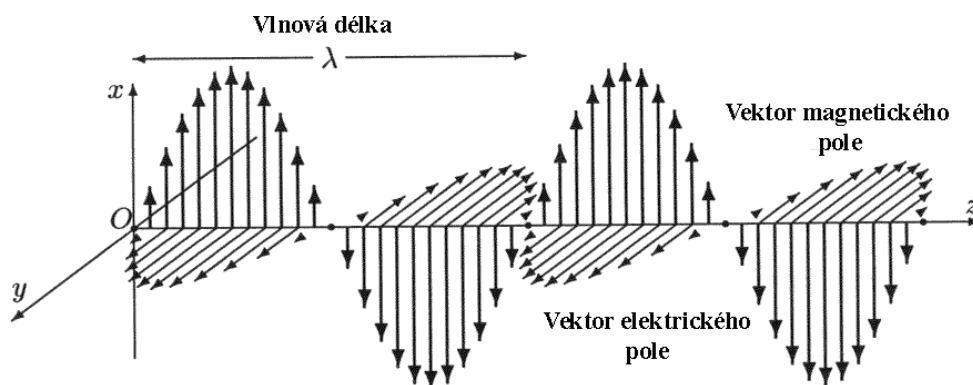
Tímto způsobem mikrovlny aktivně přenášejí svou energii do materiálu, který se má vysoušet, a tím rychle zvyšují jeho teplotu a umožňují odpařování vlhkosti.

Mikrovlny představují typ elektromagnetického záření, který se nachází v určitém rozsahu elektromagnetického spektra. Tento rozsah zahrnuje frekvence od 300 MHz do 300 GHz, což odpovídá vlnovým délkám v rozmezí 1 mm až 1000 mm. Mikrovlny mají své specifické využití v různých technických aplikacích, včetně mikrovlnných troub a dalších zařízení, která využívají mikrovlnného záření pro specifické účely.

Pro odstranění vlhkosti ze zdiva se využívá mikrovlnného záření s frekvencí 2450 MHz, což odpovídá vlnové délce 122 mm. Tato frekvence byla zvolena záměrně, aby se minimalizovaly možné interference s telekomunikačními frekvencemi, což by mohlo způsobit elektromagnetické rušení (EMI).

Mikrovlnné záření působí na živé organismy dvěma způsoby: netepelnými (vratnými) a tepelnými (nevratnými) efekty. Rozhraní mezi těmito efekty je určeno intenzitou mikrovlnného záření nebo výkonovou hustotou. Tepelné efekty vznikají v organismu kvůli dielektrickým ztrátám, kdy dochází k pohybu molekul, vzájemnému tření a srážkám, což může způsobit místní přehřátí. Toto přehřátí může být problematické, zejména u méně prokrvovaných částí těla. Na základě těchto principů se mikrovlny používají k odstranění vlhkosti z konstrukcí a také k likvidaci škůdců.

Mikrovlnné záření se šíří rychlostí světla ve formě vln, přičemž elektrické a magnetické složky záření periodicky oscilují v čase. Toto záření má sinusový průběh s určitou délkou vlny a frekvencí, což určuje počet oscilací za jednotku času. Schéma tohoto vlnění je zobrazeno na obrázku 17.<sup>35, 40</sup>



Obrázek 17. Schéma elektromagnetické vlny délky  $\lambda$  – elektrická (x) a magnetická složka (y) vlnění<sup>35, 40</sup>

## 6.2 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou fundamentální rovnice elektromagnetismu, které ukazují, že elektrické a magnetické pole jsou vzájemně propojené a tvoří jeden celek, který nazýváme elektromagnetickým polem. Tyto rovnice jsou klíčovým kamenem v elektromagnetické teorii a popisují chování elektromagnetického pole v různých situacích.

Hlavním přínosem Maxwella bylo, že sjednotil teorii elektřiny a magnetismu do jednotného rámce a popsal ji pomocí několika diferenciálních rovnic. Tyto rovnice byly navrženy tak, aby byly jednoduché a obecné, což znamená, že platí nejen pro statické situace, ale i pro nestacionární elektromagnetické pole, které se mění v čase. Tím Maxwellovy rovnice umožnily širší aplikaci elektromagnetismu a měly hluboký vliv na fyziku a techniku.<sup>40</sup>

## 6.3 Vysoušení stavebních látek

Molekuly vody jsou elektricky neutrální, ale mají bipolární charakter. To znamená, že mají rozdílně nabitě části uvnitř molekuly. Konkrétně má molekula vody kladně nabitě jádro vodíku a záporně nabitě kyslík. v elektrickém poli se molekuly vody orientují podle polarizace tohoto pole.

Mikrovlnné záření má vlastnost střídání polarizace svého elektromagnetického pole mnohokrát za sekundu, což je dáno jeho frekvencí. Toto střídání polarizace vede k rychlým změnám elektrického pole, a tím k pohybu a orientaci molekul vody.

Molekuly vody se tak v mikrovlnném poli rychle přeorientovaly podle polarizace pole, což vede k jejich pohybu, tření a vzájemné interakci. Tato interakce vytváří tepelnou energii a způsobuje ohřev a odpařování vody v konstrukci při mikrovlnném vysoušení.

Při vysokých frekvencích mikrovlnného záření, což znamená při rychlém střídání polarizace elektromagnetického pole, dochází k jevu nazývanému polární rotace nebo frikce.<sup>41</sup> Tento jev lze jednoduše popsat tím, že když mikrovlny proniknou do materiálu, dochází k rychlým změnám polarizace molekul volně vázané vody v tomto materiálu. Tyto změny polarizace způsobují rychlý pohyb těchto molekul v rámci materiálu. Během tohoto pohybu se molekuly vzájemně narážejí, což generuje tepelnou energii. Tato tepelná energie způsobuje intenzivní přeměnu vody z kapalného skupenství na plynné a následně k odpařování vody z materiálu.

Doba potřebná k vysoušení materiálu pomocí mikrovln závisí na několika faktorech, včetně druhu a tloušťky materiálu a míry jeho zvlhčení.

---

<sup>41</sup> HÁJEK, M. – Princip mikrovlnných metod a jejich využití, s. 7-9, 2003, sborník z konference STOP-Mikrovlnné metody při ochraně památek.

Když mikrovlny vstupují do materiálu, mění se rychlost jejich šíření a délka vlny v závislosti na vlastnostech tohoto materiálu. Účinek interakce mikrovln s materiálem, na který jsou směřovány, je ovlivněn složením a strukturou materiálu, jeho fyzikálním stavem a také výkonem a frekvencí použitých mikrovln. Některé materiály, jako dřevo, keramika a sklo, jsou pro mikrovlny průhledné, což znamená, že mikrovlny procházejí těmito materiály. Naopak kovy odrážejí mikrovlny.

Zatímco existují výzkumy týkající se vlivu mikrovln na biologické materiály, zatím byl prokázán pouze tepelný účinek mikrovln na tyto materiály.

Mikrovlenný ohřev je efektivní a ekonomický proces založený na elektromagnetické indukci. Tepelný proces probíhá uvnitř materiálu, a nikoliv pouze na jeho povrchu. Mechanismus, jakým se mikrovlenná energie přeměňuje na teplo, lze popsat následujícím vztahem:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon'' \cdot E^2$$

- kde  $P$  je energie absorbovaná v jednotce objemu,  
 $f$  je frekvence mikrovlenného pole,  
 $\varepsilon$  je permitivita,  
 $\varepsilon''$  je dielektrický ztrátový faktor materiálu,  
 $E$  je intenzita el. pole uvnitř materiálu.<sup>25, 26</sup>

### 6.3.1 Průběh mikrovlenného vysoušení

Průběh mikrovlenného vysoušení/vytvrzování lze rozdělit na čtyři úseky:

1. Vlastní ohřev molekul vody spojený se sekundárním ohřevem materiálu.
2. Odpařování vody obsažené v povrchové vrstvě materiálu.
3. Zvětšení objemu vody v důsledku jejího ohřevu.
4. Zvětšení objemu způsobuje nárůst tlaku, který se šíří všemi směry, tedy i k povrchu vysoušeného materiálu a způsobuje vytlačování ohřáté vody na povrch.

V průběhu postupného chladnutí dochází k průběžnému odpařování vody, která je na povrchu materiálu. v důsledku rozdílu vlhkosti na povrchu a v hloubce, dochází k rozdílu tzv. parciálního tlaku, který zabezpečí transport vlhkosti na povrch. Pro odpařování vlhkosti z povrchu vysoušeného materiálu je potřeba značné teplo (výparné teplo kapaliny). v důsledku toho dochází k ochlazení povrchu vysoušeného materiálu i vzduchu v okolí.

Faktory ovlivňující rychlost vysoušení:

1. gradient teploty,
2. obsah vlhkosti v povrchové vrstvě,
3. relativní vlhkost prostředí, které je v kontaktu s vysoušeným materiálem,
4. schopnost materiálu distribuovat vodu z jádra k povrchu,
5. povrchová úprava vysoušeného materiálu,
6. tepelná vodivost vysoušeného materiálu.<sup>22, 23, 26</sup>

#### **6.4 Působení mikrovln na molekuly vody, kovové prvky**

Při vysokých frekvencích mikrovlnného záření, což zahrnuje rychlé změny polarity a orientace molekul volně vázané vody, dochází k jejich vzájemnému pohybu a nárazům, což generuje tepelnou energii. Tato energie má za následek intenzivní přeměnu vody z kapalného skupenství na plynné a následné odpařování vody z konstrukce. Doba trvání procesu vysoušení závisí na několika faktorech, jako jsou druh a tloušťka zdiva, stupeň zvlhčení, obsah dutin ve zdivu a také pórovitost sušeného materiálu.<sup>42</sup>

Je důležité poznamenat, že mikrovlnné záření může být koncentrováno v blízkosti kovových prvků, které slouží jako sekundární antény.

To platí zejména pro prvky, které jsou menší než vlnová délka mikrovln, která je 122 mm. Toto je zvláště důležité u dřevěných konstrukcí. v případě dřevěných střešních konstrukcí může být toto nebezpečí spojeno s ocelovými spojovacími prvky, jak novými, tak i těmi původními, které nejsou viditelné. Interakce mezi mikrovlnným zářením a ohřevem dřeva v přítomnosti kovových prvků může způsobit vzplanutí dřevěného prvku, a to zejména u jeho střední části, kde je koncentrace mikrovln největší. Toto je důležitým bezpečnostním aspektem při použití mikrovlnného záření pro vysoušení konstrukcí.

---

<sup>42</sup> SVAČINA, J., RŮŽIČKA, V., PUNČOCHÁŘ, J., – Teorie obvodů v a technika velmi krátkých vln, Brno 1980

## 6.5 Biologické účinky mikrovlnného záření

Elektromagnetické záření má biologickou aktivitu, pokud jeho intenzita dosáhne dostatečně vysoké úrovně, přestože nemá ionizační účinky. To platí pro kmitočty od nuly do přibližně 1011 Hz. Tato aktivita je závislá na energii světelných kvant, a lze ji popsat vztahem:

$$W = h \cdot f,$$

kde  $h$  je Planckova konstanta s hodnotou  $6,625 \times 10^{-34}$  J·s,

$f$  je frekvence záření v  $s^{-1}$ .

Mikrovlnné záření je považováno za neionizující, což znamená, že jeho účinek na živou hmotu není způsoben ionizací atomů nebo molekul. Mechanismus biologických účinků elektromagnetického neionizujícího záření je rozmanitý a zahrnuje jak tepelné, tak netepelné účinky. Tato záření mohou mít významné biologické účinky na živé organismy.

Netepelné účinky elektromagnetického záření na živou hmotu jsou stále zkoumány, protože jejich přesný mechanismus zůstává neobjasněný. Tyto účinky jsou především fyzikálního charakteru a mohou se projevovat různými způsoby.

Důležitým aspektem je vliv elektromagnetického záření na koloidní systém živých organismů. Bylo zjištěno, že koloidní částice v organismu, které mají vždy určitý náboj, se v silném elektrickém poli chovají jako indukované dipóly. Tyto dipóly se orientují ve směru působícího elektrického pole, a nesouhlasné póly se navzájem přitahují. To může vést ke vzniku řetězců či struktur, které mohou narušovat celkovou strukturu koloidního systému. Tímto způsobem mohou vznikat změny v buněčném systému, protože i vnitrobuněčné tekutiny mají koloidní charakter.<sup>1</sup>

Experimentálně bylo rovněž zjištěno, že buňka může reagovat na elektrický potenciál své membrány, což způsobuje narušení jejího fyziologického stavu. Tato reakce je závislá na střídavém napětí indukovaném vysokofrekvenčním polem v organismu, a to zejména na vodivých dráhách, jako jsou krevní a nervový systém. Tyto změny mohou mít výrazný vliv na fungování organismu, zejména u buněk nervového systému, které ovládají celý organismus.

Důležité je, že tyto netepelné účinky mají tendenci být vratné. Když přestane elektromagnetické pole působit na organismus, buňky se postupně vrací do svého normálního fyziologického stavu, pokud nedošlo k trvalým poškozením.

Nevratné změny ve tkáních organismu mohou nastat, pokud byly buňky vystaveny elektromagnetickému záření po delší dobu za změněných podmínek. Pravděpodobnost těchto nevratných změn je vyšší při vyšší intenzitě pole a delším trvání expozice elektromagnetického záření. Když je organismus opakovaně vystavován elektromagnetickému záření, biologické účinky se mohou kumulovat, a organismus se stává vnímavějším k účinkům pole.<sup>42</sup>

Je důležité poznamenat, že biologické změny jsou závislé nejen na střední hodnotě ozáření (celkovém dávkovém efektu) ale také na okamžité hodnotě intenzity pole (instantním efektu). z tohoto pohledu může být impulzně pracující generátor, který generuje elektromagnetické pole v krátkých pulzech, biologicky účinnější než neimpulzně (kontinuálně, CW) pracující generátor se stejným středním výkonem a na stejném kmitočtu.

## **6.6 Mikrovlnné zařízení pro vysoušení vlhkých stavebních látek**

Během mikrovlnného ohřevu dochází k rychlému vstřebávání mikrovln a současně k rychlému zvyšování teploty sušené stavební látky. Rozložení teplot v průřezu konstrukce je ovlivněno skladbou zdiva a stavebních materiálů, zejména jejich pórovitostí a obsahem dutin, a také povahou mikrovlnného záření.

Mikrovlny zejména absorbované molekulami vody v prostředí, což způsobuje ohřev stavebního materiálu vedením od zahřátých molekul vody, které se mění v horkou vodní páru. To znamená, že teplota vody bude vyšší než teplota samotného stavebního materiálu.

Výzkum teplot v průběhu mikrovlnného vysoušení stavebních materiálů ukázal, že prohřívání narůstá od středu látky směrem ven. Konkrétně je nejvíce prohřívána oblast poblíž antén, kde je vlhkost největší.

S postupným snižováním vlhkosti směrem od antén se teplota prohříváných oblastí zvětšuje. To je způsobeno tím, že úbytek vlhkosti umožňuje mikrovlnám pronikat dále do materiálu, dokud není úplně utlumeno.<sup>1</sup>

## **6.7 Skladba mikrovlnného zařízení**

Składbu mikrovlnného vysoušecího zařízení lze zjednodušeně popsat následovně:

1. Zdroj elektrické energie: Transformuje elektrickou energii a napětí a přivádí ji k vývodům pro kabelové vedení.
2. Kabelové vedení: Přivádí transformovanou elektrickou energii a napětí do mikrovlnného generátoru.

3. Mikrovlnný generátor: Součástí mikrovlnného generátoru je magnetron nebo klystron, který prostřednictvím budiče mikrovln přeměňuje elektrickou energii na mikrovlnné záření.
4. Vlnovod: z budiče mikrovln vstupuje záření přímo do vlnovodu, odkud je přiváděno dál.
5. Anténa pro vyzařování mikrovlnného záření: Prostřednictvím mikrovlnné antény (buď tyčové nebo trychtýřové) je mikrovlnné záření vyzařováno směrem do volného prostoru na předem stanovené místo na stavební konstrukci. Zde může být záření odraženo, pohlceno nebo konstrukcí prostupováno.

Toto jsou základní součásti mikrovlnných vysoušecích zařízení, přičemž mohou existovat variace a různé technické specifikace u různých výrobců, ale princip fungování zůstává podobný.

V současné stavební praxi se používá několik druhů mikrovlnného záření (MW) pro vysoušení vlhkých stavebních konstrukcí. Tyto zařízení mohou mít různé výkony, včetně těch s velmi vysokými MW frekvencemi a výkony nad 3000 W. Je důležité poznamenat, že některá zařízení nemusí mít příslušnou certifikaci, což může ovlivnit jejich účinnost a bezpečnostní standardy.

Je důležité, aby všechna zařízení používaná v praxi pro mikrovlnné vysoušení měla odpovídající certifikaci a byla prováděna s ohledem na bezpečnost a účinnost. Použití nevhodných zařízení může mít nežádoucí účinky na stavební konstrukce, a proto je důležité dodržovat standardy a postupy pro mikrovlnné vysoušení v souladu s aktuálními předpisy a normami.

Existují různé metody mikrovlnného vysoušení, ale v této práci se zaměřujete na metodu ozařování a vysoušení stavebních látek pomocí příložených trychtýřových antén.

Princip této metody zahrnuje přiložení zařízení s trychtýřovou anténou ke zdivu na vzdálenost od 0 do 50 mm a nechání jej působit na jednom místě po určitý čas. Pro účinné vysoušení se zařízení pohybuje, aby se zabránilo vzniku podpovrchových kapes a zajišťuje se ohřev v hloubce zdiva. Tato metoda může být také využita k sterilizaci konstrukcí a odstranění škůdců ze zdiva.

V případech, kdy je potřeba rychle odstranit vlhkost z konstrukcí, například po povodních, se může provádět delší doba zahřívání, až dokud hmotnostní vlhkost zdiva nedosáhne 5 %. I když je tento proces relativně pomalý ve srovnání s jinými metodami, je podstatně rychlejší než některé tradiční metody.

Pro zlepšení odvodu vody z povrchu konstrukcí může být užitečné použití konvekčních odvlhčovačů a ventilátorů, což pomáhá vylepšit proudění vzduchu a odvod vlhkého vzduchu mimo sušenou místnost. Tato metoda mikrovlnného vysoušení je jistě zajímavá alternativa pro rychlé a účinné odstranění vlhkosti ze stavebních konstrukcí.

Metoda mikrovlnného vysoušení má omezené možnosti v případě zdiva s dutinami nebo kavernami, protože mikrovlny se utlumují a nedokážou proniknout do hloubky zdiva. v těchto případech je výhodnější použití metody mikrovlnného vysoušení s tyčovou anténou. Jednou z nevýhod této metody je, že vyžaduje destruktivní zásah do materiálu, konkrétně vrtání vysoušecích otvorů.<sup>1</sup>

## 7 Vymezení problému a stanovení cíle práce

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1., v Evropě je v současné době celá řada metod, které slouží jako doplňková sanace. Vzhledem ke stále vyšším nárokům na tyto metody je vhodné a žádoucí hledat metody nové a zajistit tak časovou a ekonomickou úsporu.

Vysoušení hmot a stavebních konstrukcí musí být zejména rychlé, efektivní a ekonomicky výhodné. Tyto požadavky splňuje mimo jiné i mikrovlnné vysoušení. Nespornou výhodou této metody je, oproti jiným metodám vysoušení, že působí v celém objemu vysoušeného materiálu či konstrukce.

### 7.1 Vymezení problémů

Mikrovlnné vysoušecí zařízení představují složité technologie, které se běžně nenacházejí na komerčním trhu. Většinou jsou vyráběny na zakázku různými specializovanými firmami, které se zabývají vývojem těchto sofistikovaných zařízení. Bohužel, společnosti angažované ve výzkumu a vlastním vývoji mikrovlnných vysoušecích zařízení postupně ubývají.

Současně s vývojem výzkumných institucí a vysokých škol se na trhu objevují firmy, které se zaměřují na aplikace mikrovlnného vysoušení. Tyto společnosti často nadhodnocují schopnosti svých zařízení ve snaze získat konkurenční výhodu. Bohužel, v mnoha případech chybí relevantní informace o parametrech a charakteristikách zařízení, a není jasné, za jakých podmínek byly tyto charakteristiky určeny. Používání mikrovlnného vysoušení bez vlastního ověření těchto parametrů pro konkrétní praktickou aplikaci může být rizikové.

Situace na trhu s aplikacemi mikrovlnného záření pro stavební látky a konstrukce v České republice i v Evropě je zdánlivě vyřešená, ale ve skutečnosti je komplikovaná. Některé firmy prezentují mikrovlnné vysoušení jako účinný a levný způsob odstranění vlhkosti z konstrukcí, ale výzkumné práce na FAST VUT v Brně naznačují opak. Množství vysušené vlhkosti za daný čas, které slibují výrobci, není běžně dosažitelné běžnými komerčně dostupnými mikrovlnnými vysoušeči.

Dalším problémem je nevhodnost mikrovlnného vysoušení v oblastech s kovovými prvky ve zdivu nebo v ozařovaných konstrukcích. Existují také zdravotní obavy ohledně mikrovlnného záření pro osoby pohybující se v jeho blízkosti během vysoušení, což bylo potvrzeno několika studiemi. Bezpečnostní opatření při aplikaci mikrovlnného vysoušení jsou klíčová, ale relevantní informace často chybí.

Navzdory těmto výzvám je mikrovlnné vysoušení efektivní a bezpečné, pokud jsou dodržovány bezpečnostní zásady. Vědecký výzkum zaměřený na praktické ověření účinků

mikrovlnného vysoušení různých stavebních materiálů a konstrukcí je klíčovým směrem vývoje. Je však důležité, aby tyto experimenty byly dobře definované a měřily všechny relevantní charakteristiky pro následnou validaci.

## 7.2 Vymezení cílů

V práci byly stanoveny dva hlavní cíle, které směřovaly k analýze působení mikrovlnného záření na stavební hmoty.

Prvním hlavním cílem je analýza působení mikrovlnného záření na fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot, případně stavebních konstrukcí.

Druhým hlavním cílem je analýza působení mikrovlnného záření na čas hydratace, tuhnutí a tvrdnutí a následné fyzikální a mechanické charakteristiky stavebních hmot.

Tyto cíle byly dosaženy prostřednictvím dvou skupin experimentálních programů, zahrnujících studium cihelných zdících prvků a čerstvých směsí se silikátovou pojivovou složkou.

První skupina experimentální činnosti je zaměřená na cihelné zdící prvky, kde byla zkoumána možnost využití mikrovlnného záření pro vysoušení. Tato metoda byla standardně aplikována při sanaci vlhkého zdiva, ale nebylo zcela známo, jak by vysoušení mikrovlnným zářením ovlivnilo fyzikální a mechanické vlastnosti cihelných prvků. Důležité je podotknout, že experimenty probíhaly na vzorcích cihel označených jako P20. Další experimenty související s touto problematikou, které byly provedeny jako součást dalšího výzkumu, nebyly vzhledem k celkovému rozsahu v této práci detailně publikovány.

Druhá skupina experimentů byla věnována možnostem využití mikrovlnného záření na čerstvé směsi se silikátovou pojivovou složkou, která hydratuje. Je obecně známo, že při vyšších teplotách silikátový hydratovaný materiál tuhne a ztvrdne rychleji než materiál tuhý a ztvrdlý běžným způsobem. Přestože bylo známo, že výsledné pevnosti mohou být nižší, provedené experimenty s tímto materiálem měly nejednoznačné výsledky, a proto toto nebylo možné jednoznačně konstatovat. Cílem těchto experimentů bylo sjednotit existující informace a provést další analýzy, včetně RTG analýzy, kde byly zkoumány prvky přítomné během hydratace ve vzorcích.

Výsledky všech experimentů byly integrovány do několika článků, publikovaných v periodikách s vysokým impakt faktorem. Tímto způsobem bylo zajištěno, že široká veřejnost, včetně odborníků, měla přístup k informacím o probíhajícím výzkumu. Tato práce nejenže

prezentuje dosažené výsledky, ale také poskytuje platformu pro další rozšíření a zkoumání této oblasti v budoucnu.

### **7.3 Experimentální program**

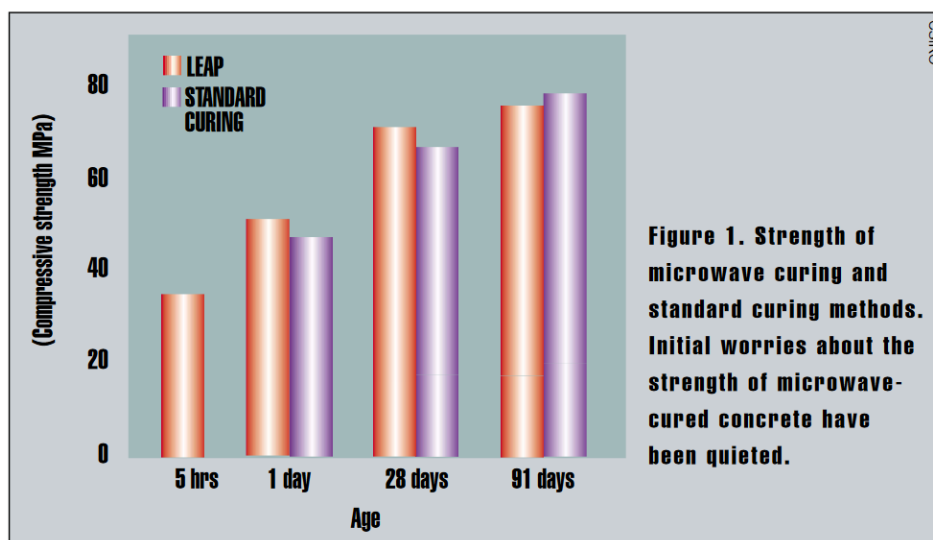
V rámci práce byly provedeny experimenty, týkající se přímo vlivu působení mikrovlnného záření na stavební hmoty, ale nejsou zde podrobněji přímo uvedeny, namísto toho se v práci uvádí dva dokončené experimenty.

Prvotní experimenty zkoumaly například vliv působení mikrovlnného záření na tepelně-izolační hmoty a plastické látky. Tyto experimenty byly řádně sepsány a publikovány v mezinárodních periodikách, ale jedná se o počáteční výzkum, na který autor naváže v budoucnu. Jednalo se například o využití odpadních tepelně izolačních hmot jako plnivo do keramických cihel, optimalizace tvaru cihel, využití mikrovlnného záření pro urychlení tuhnutí pojivové složky z vybrané hmoty, kde jako plnivo sloužily odpadní hmoty atd. Z hlediska práce pak autor předkládá pouze dokončené experimenty s prokazatelnými výsledky, které mohou obohatit stavební praxi o důležité poznatky.

## 8 Experimentální program 1

### 8.1 Urychlování tuhnutí betonových směsí

Možné využitím mikrovlnného záření ve stavební praxi může být při tuhnutí kompozitních směsí, například v kompozitech, kde jsou využity silikátové materiály, které hydratují. Konkrétně například urychlení tuhnutí betonu v jeho počátečních fázích a nabytí manipulačních pevností. Takto by byla možnost rychleji dostat betonové dílce z forem a zajistit tak vyšší míru produkce. Pilotní výzkumy proběhly již v roce 2002. Postarala se o ně společnost australská společnost Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) pod vedením Dr. Swee Liang Mak a nazvala tento výzkum Low Energy Accelerated Processing (LEAP). Výsledkem jejich pilotního výzkumu bylo, že lze využít mikrovlnné záření pro urychlení tuhnutí betonu, přičemž rozdíl pevností u referenčních vzorků betonu a vzorků betonu, kde proběhlo urychlení tuhnutí je do 10 % po 28 dnech a po 4 hodinách a 30 min je dokonce dosaženo při vodním součinitel 0,5 zhruba 4násobné pevnosti proti referenčním vzorkům.<sup>43</sup>



Obrázek 18. Pevnost betonu v tlaku vzorků referenčních, které tuhly na vzduchu a vzorků betonu, kde proběhlo urychlení tuhnutí pomocí mikrovlnného záření<sup>43</sup>

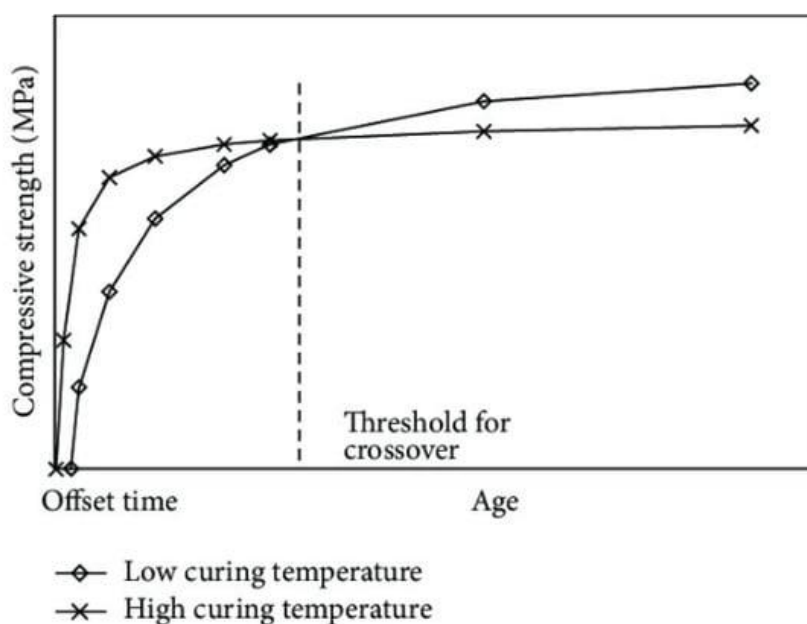
Předložený výzkum navazuje na počátečních, předešlé výzkumy a dále je rozšiřuje zejména o analýzu působení mikrovlnného záření na C-S-H gely při tuhnutí betonu a následně na vlastnosti ztvrdlého betonu.

<sup>43</sup>Fuhrmann, J.M. Micro-curing. Concrete Construction 2002. Available online: [https://www.concreteconstruction.net/\\_view-ob-460ject?id=00000154-1d54-db06-a1fe-7f5ca5030000](https://www.concreteconstruction.net/_view-ob-460ject?id=00000154-1d54-db06-a1fe-7f5ca5030000)

Zkoumány jsou zastoupení jednotlivých minerálů pomocí DTA a RTG analýzy a jejich struktura pomocí mikroskopu. Dále jsou pak metodicky ověřeny výstupy z předcházejících experimentů – ověřeny jsou pevnostní charakteristiky a nasákavost.

### 8.1.1 Hlavním cílem práce je ověření možnosti využití mikrovlnného záření při tuhnutí betonu.

Důvodem pro tento experiment je snaha urychlit proces tuhnutí tak, aby bylo možno snížit časovou náročnost, kdy produkty musí být uloženy ve formách, než získají manipulační pevnost. Při urychlení tuhnutí a získání manipulační pevnosti dříve by tak byla zajištěna vyšší produkce betonu. Snahy o urychlení procesu tuhnutí betonu v minulosti již proběhly a existuje celá řada způsobů, jak urychlit tento proces. Nicméně výsledné vlastnosti betonu se značně liší od referenčních hodnot, standardně je pevnost betonu, kde proběhlo urychlení tuhnutí, nižší o 20 %.<sup>44</sup>



Obrázek 19. Graf vývoje pevnosti betonu v důsledku různých počátečních teplot vytvrzování, 2015.<sup>45</sup>

Kjellsen a Detwiler<sup>46</sup> zjistili, že 28denní pevnost v tlaku vzorků betonu, které tuhly při 5 °C je přibližně 80 % pevnosti vzorků odlitých a vytvrzených při 21 °C až 46 °C. Pevnost

<sup>44</sup> Sumra Yousuf, Payam Shafigh, Zainah Ibrahim, Huzaifa Hashim, Mohammad Panjehpour Crossover Effect in Cement-Based 462

Materials: A Review. Applied Sciences, 2019, mdpi.com.

<sup>45</sup> Yang, K.-H.; Mun, J.-S.; Cho, M.-S. Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High- 464

Strength Concrete. Adv. Mater. Sci. Eng. 2015, 2015, 12.

<sup>46</sup> Kjellsen, K.; Detwiler, R. Later-age strength prediction by a modified maturity model. ACI Mater. J. 1993, 90, 220–227.

v tlaku v pozdějším věku bude nižší při vyšších teplotách betonáže. Podle Newmana a Choo<sup>47</sup> je pevnost v tlaku v po delší době betonů, které byly vystaveny vyšším teplotám, obecně nižší než pevnost v tlaku standardně vytvrzených betonů a je to způsobeno nižší rychlostí reakce při nižších teplotách. v praxi to znamená, že malty a betony by měly být vytvrzovány delší dobu, aby získaly požadovanou pevnost. Khan a Abbas<sup>48</sup> uvádějí, že reakce při zvýšených teplotách poskytuje relativně vysoké pevnosti v raném věku, ale dlouhodobá pevnost a trvanlivost jsou běžně sníženy. Lothenbach a kolektiv<sup>49</sup> uvádí, že hydratace cementu je silně ovlivněna teplotou.

Vyšší teplota vede hydrataci k vysoké pevnosti v raném stádiu. v pozdějším věku se pevnost cementů hydratovaných při vysoké teplotě snižuje ve srovnání s cementy hydratovanými při pokojové teplotě. Sajedi a Razak<sup>50</sup> uvedli, že změny teploty způsobené buď teplem hydratace, nebo změnami vnějšího prostředí výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti, zejména pevnost betonu a malty v tlaku v rané fázi. Kim a kolektiv<sup>51</sup> experimentálními výsledky prokázali, že betony a malty vystavené vysokým teplotám získávají větší pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu v rané fázi, ale nižší pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu v pozdějším věku ve srovnání s betony vystavenými pokojovým teplotám při tuhnutí. Namarak a kolektiv<sup>52</sup> uvádí, že zvýšená teplota vytvrzování může urychlit pucolánové i hydratační reakce a dosáhnout větší pevnosti v tlaku v raném věku. v pozdějším věku však malty a betony, které tuhly při vysoké teplotě dosahují pevnosti v tlaku menší než při normální teplotě při tuhnutí.

Podobné chování konstatovali také Ezziane a kolektiv<sup>53</sup>, přičemž došlo ke snížení pevnosti v tlaku, když byly betony vystaveny vysoké teplotě při tuhnutí s náhradou cementu přírodním pucolánem. Tyto poznatky kontrují výsledky Dr. Swee Liang Mak<sup>45</sup>, u jehož výzkumu, kde pomocí mikrovlnného záření urychloval tuhnutí betonu, byly výsledky pevností v tlaku vzorků vytvrzených pomocí mikrovlnného záření srovnatelné s výsledky pevností u referenčních vzorků.

---

<sup>47</sup>Newman, J.; Choo, B.S. *Advanced Concrete Technology 3: Processes*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2003.

<sup>48</sup>Khan, M.S.; Abbas, H. Performance of concrete subjected to elevated temperature. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2016, 20, 532–543.

<sup>49</sup>Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E.; Lunk, P. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 2007, 37, 483–491.

<sup>50</sup>Sajedi, F.; Razak, H.A. Thermal activation of ordinary Portland cement–slag mortars. *Mater. Des.* 2010, 31, 4522–4527.

<sup>51</sup>Kim, J.-K.; Han, S.H.; Song, Y.C. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. *Cem. Concr. Res.* 2002, 32, 1087–1094.

<sup>52</sup>Namarak, C.; Satching, P.; Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash-calcium carbide residue. *Constr. Build. Mater.* 2017, 147, 713–719.

<sup>53</sup>Ezziane, K.; Bougara, A.; Kadri, A.; Khelafi, H.; Kadri, E. Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature. *Cem. Concr. Compos.* 2007, 29, 587–593.

Jelikož je pojivovou složkou betonu cement, experiment zkoumá a ověřuje vliv působení mikrovlnného záření právě na něj, resp. na CSH gel.<sup>54</sup>

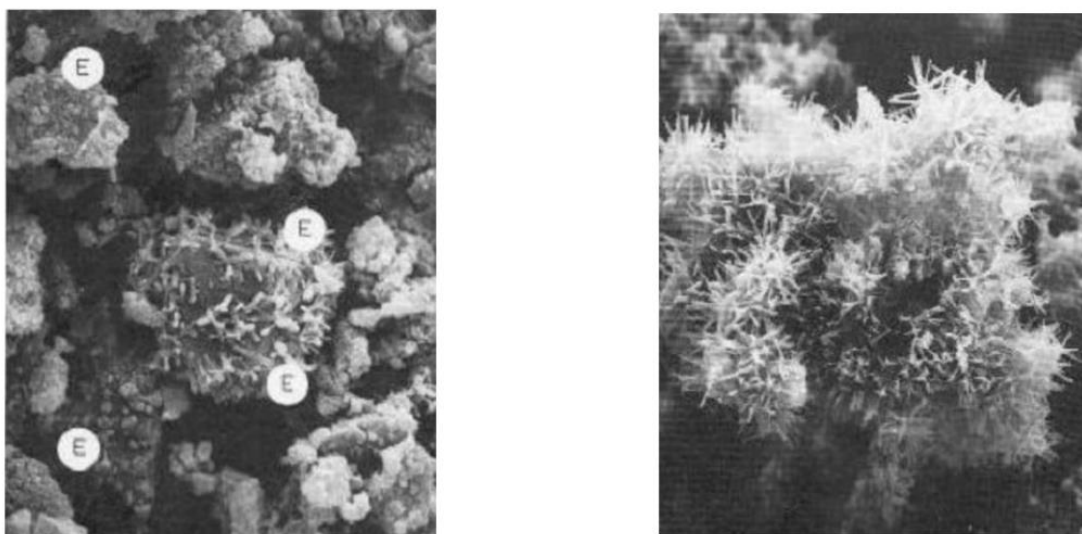
Je zde tedy možnost dále rozšířit tento výzkum na různé druhy betonu.

## 8.2 Využití materiály

### 8.2.1 Pojivo – cement

Cement, který slouží jako pojivo betonu, je nejrozšířenějším silikátovým materiálem. Má vynikající vlastnosti, například vysoká pevnost a cenová výhodnost. Cement je práškové hydraulické pojivo, které tuhne a tvrdne ve vodním prostředí i na vzduchu. k tomu, aby cement plnil účel pojiva je potřeba voda k hydrataci. Během hydratace se tvoří tzv. C-S-H gel.

Kalcium silikátový hydrát (CSH), primární reakční produkt hydratace cementu, tvoří více než 60 % objemu hydratovaného portlandského cementu a je zodpovědný za trvanlivost a pevnost cementu a betonu.<sup>55, 56, 57</sup>



Obrázek 20. Vzhled jehlicovité struktury ettringitu na cementových zrnech po 1 hodině hydratace<sup>56</sup>

<sup>54</sup> Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Novotný, M. The effect of EMW radiation on the solidification of C-S-H gels: its influence on the mechanical and physical properties of solidified cement mixtures. *Gels* 2023, přijato k publikování

<sup>55</sup> Alizadeh, R.; Beaudoin, J.J.; Raki, L. Mechanical properties of calcium silicate hydrates. *Mater. Struct.* 2011, 44, 13–28.

<sup>56</sup> Pellenq, R.-M.; Lequeux, N.; Van Damme, H. Engineering the bonding scheme in C-S-H: The ionic-covalent framework. *Cem.* 481

*Concr. Res.* 2008, 38, 159–174.

<sup>57</sup> Nonat, A. The structure and stoichiometry of C-S-H. *Cem. Concr. Res.* 2004, 34, 1521–1528.

### 8.2.1.1 Druhy cementu

ČSN EN 197–1 uvádí pro obecné použití následujících pět skupin cementů podle složení:

- CEM I — portlandský cement.
- CEM II — portlandský cement směsný.
- CEM III — vysokopecní cement.
- CEM IV — pucolánový cement.
- CEM V — směsný cement.<sup>58</sup>

Jako pojivo pro daný experiment byl zvolen portlandský cement **CEM I 42,5 R**.

### 8.2.1.2 Portlandský cement

Portlandský cement (p-cement) je práškové hydraulické pojivo, které je tvořeno jemně mletým křemičitanovým slínkem a zpomalovačem tuhnutí. Po smíchání s vodou tuhne a následně tvrdne za vzniku velmi pevné hmoty, která je stálá jak na vzduchu, tak i ve vodním prostředí.

Portlandský cement je pojivovou složkou mnoha kompozitních materiálů, zejména betonu.

Výhodou ztvrdlého cementového tmelu je jeho vysoká pevnost v tahu, nevýhodou pak jeho nízká pevnost v tahu za ohybu a nízká odolnost proti působení chemicky agresivních látek.

Portlandský cement je založen na křemičitanovém slínku. Jednosložkový cement obsahuje pouze křemičitanový slínek a zpomalovač tuhnutí. Křemičitanový slínek je základní surovinou pro výrobu směsných cementů, kdy se slínek mísí se struskou, popílkem, vápencem atd.

Suroviny pro výrobu cementu jsou vápence s obsahem jílu. Pokud se využívají čisté vápence, pak se jílové složky přidávají do surovinové směsi z jiného zdroje například jíly, slíny, břidlice, lupky atd. Jako korekční složka suroviny se používá bauxit, odpady z hutnictví a křemenný písek. v surovině je omezen obsah oxidu hořečnatého tak, aby byl jeho obsah ve výsledném produktu maximálně 6 % a to z důvodu možnosti pozdní tvorby hydroxidu hořečnatého, který způsobuje tzv. hořečnaté rozpínání.

Poměr složek  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$  v surovinové směsi musí být takový, aby všechny oxid vápenatý zreagoval na sloučeniny schopné hydraulického tvrdnutí – na slínkové minerály.

---

<sup>58</sup> ČSN EN 197-1 ED.2 (722101) Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2012.

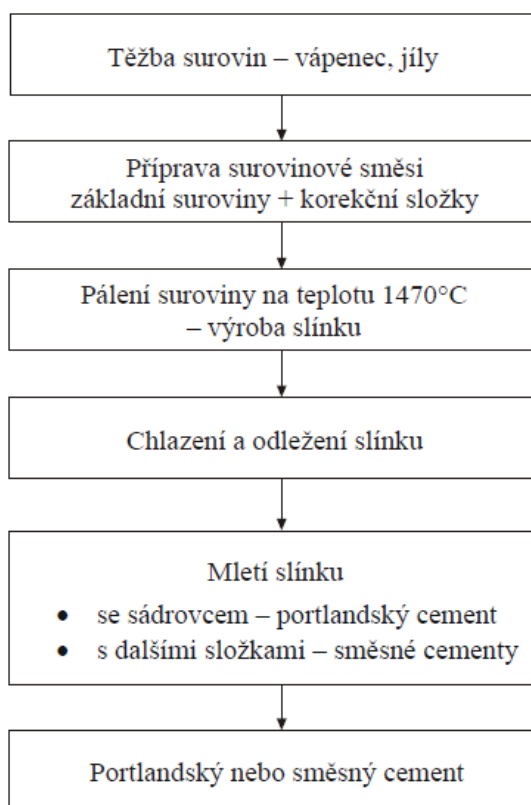
Výroba p-cementu spočívá v přípravě surovinové směsi, jejím výpalu na slínek, následném chlazení, odležení slínku a mletí slínku s regulátorem tuhnutí.

Podle způsobu přípravy surovinové moučky se p-cement vyrábí mokrým nebo suchým způsobem.

Mokrý způsob výroby spočívá ve vytvoření surovinového kalu s 33–40 % vody, v něm byla směs dokonale zhomogenizována. Tento způsob je energeticky náročný, jelikož je nutno vodu ze suroviny odpařit. Měrná spotřeba tepla je 5 MJ na 1 kg slínku.

Při suchém způsobu výroby se surovina upravuje ve formě zavlhle směsi, která před vstupem se před vstupem do pece vysuší ve výměníku tepla. Při tomto způsobu výroby je měrná spotřeba tepla přibližně 3 MJ na 1 kg slínku. v současné době všechny cementárny v České republice využívají režim suché výroby.

Připravená surovinová směs se z natěžených surovin a korekčních složek mele v bubnových mlýnech a následně přes výměníky tepla putuje do rotační pece. Rotační pec je ocelová roura s žáruvzdornou vyzdívkou o délce 120 až 180 m, průměru 6 m a sklonu 7°. <sup>59</sup>



<sup>59</sup> Rovnaník, P. a kol. Stavební chemie. Studijní opory. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2014.

<sup>60</sup> Gazdič, D a kol. Maltoviny. Studijní opory. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2017.

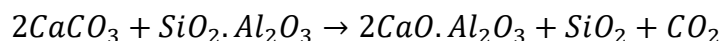
### 8.2.1.3 Stádia výpalu

#### A. Předeřívací (do 750 °C):

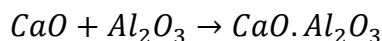
- do 200 °C dochází k dehydrataci,
- nad 200 °C dochází k dehydroxilaci,
- jako první se vázaná voda uvolní z dvouvrstvých minerálů,
- při 400 °C uvolňují vázanou vodu trojvrstvé minerály,
- při teplotě 560 °C dochází k fázové přeměně β-křemene na α-křemen,
- následuje počátek tvorby slínkových minerálů substituční formou (CA, C<sub>2</sub>F).

#### B. Kalcinační (750–1150 °C):

- od 600 °C se rozkládá CaCO<sub>3</sub>,
- dochází k tvorbě nízkovápenatých slínkových minerálů (CA, C<sub>2</sub>F) zpočátku substitučně



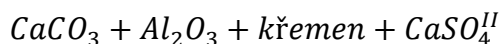
- následně adičně



- fáze je zakončena počátkem tvorby vysokovápenatých slínkových minerálů C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF a ke konci pak C<sub>2</sub>S.

#### C. Suché slinování (1150–1250 °C):

- intenzivní tvorba C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF, C<sub>2</sub>S,
- mohou vznikat i nehydraulické fáze (periklas, gehlenit)



- Díky přítomnosti anhydritu vzniká minerál „Kleinův komplex“ (4CaO · 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · CaSO<sub>4</sub>), který vyvázáním síranů zabraňuje jejich unikání do atmosféry.

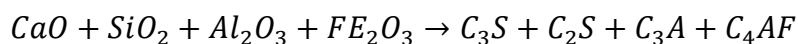
#### D. Chladicí

- β-C<sub>2</sub>S se modifikačně přeměňuje při 675 °C na γ-C<sub>2</sub>S,
- γ-C<sub>2</sub>S je nehydraulický, a proto je nutné směs chladit, aby β-C<sub>2</sub>S zůstal v tzv. nestabilním podchlazeném stavu.<sup>60</sup>

Tabulka 8. Obecné oxidové složení portlandského cementu<sup>59</sup>

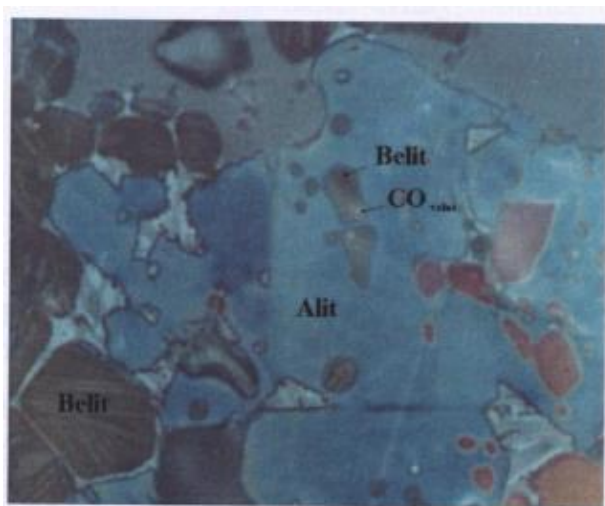
Složka	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O
[%]	60–69	18–24	4–10	1–8	max. 6	max. 1,5

Výpalem surovinové směsi se získá slínek, který tvoří čtyři základní slínkové minerály a nízké množství volného CaO a MgO. Obecně lze proces popsat jednoduchou rovnicí reakcí čtyř základních oxidů obsažených ve sloučeninách surovinové směsi:



#### 8.2.1.4 Slínkové materiály

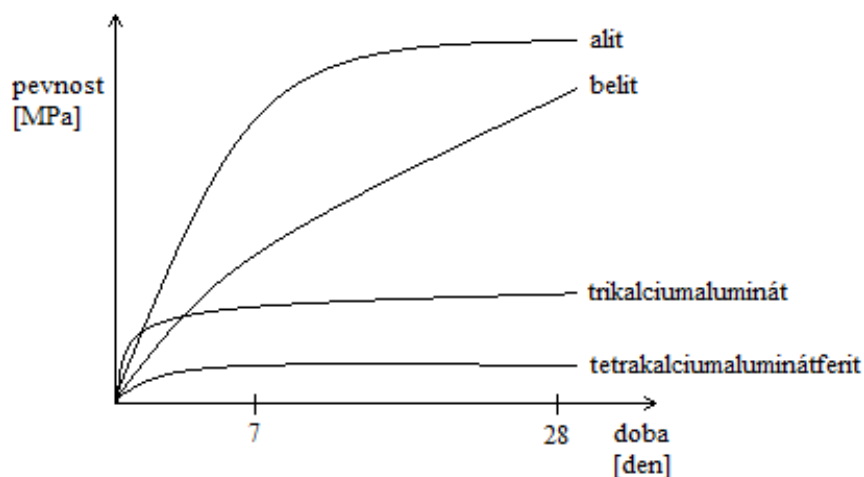
- A. Alit,  $C_3S$ , má vysokou hydraulickou aktivitu, reaguje rychle s vodou, je nositelem počátečních i konečných pevností.
- B. Belit,  $\beta$ - $C_2S$ , může obsahovat malé množství alkalických kovů, které stabilizují  $\beta$ -formu. Ostatní formy  $C_2S$  nejsou hydraulicky aktivní, belit reaguje s vodou opožděně a přispívá ke konečným pevnostem.
- C. Trikalciumaluminát,  $C_3A$ , se nachází ve tmavé skelné fázi, reaguje s vodou nejrychleji.
- D. Tetraalkciumaluminátferit,  $C_4AF$  (brownmillerit).<sup>60</sup>



Obrázek 22. Fotografie nábrusu vzorku napařeném nad ledovou kyselinou octovou<sup>60</sup>



Obrázek 23. Fotografie nábrusu vzorku s belitickými zrnky<sup>60</sup>



Obrázek 24. Graf nárůstu pevností slínekových minerálů<sup>60</sup>

### 8.2.1.5 Stádia hydratace

Tuhnutí a tvrdnutí cementu je komplex fyzikálních a chemických dějů. Fyzikální děje zahrnují změnu s plastického do pevného stavu. Dochází k vytvoření pevných spojů mezi zrny kameniva a hydratačními produkty cementu. Hydratační produkty vyplňují prostor, který původně vyplňovala voda a vzniká produkt pevný – cementový tmel.

Chemické děje jsou hydrolyza s následnou hydratací. Silikátové slínekové minerály hydratují za vzniku křemičitanů vápenatých (C-S-H gelů) a aluminátová fáze hydratuje za vzniku hydratovaných hlinitanů vápenatých.<sup>60</sup>

#### A. První stádium

- $C3A + CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2H_2O \rightarrow C3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ; první podíly ettringitu
- Doba trvání 5–10 min

#### B. Druhé stádium (stádium reakčního klidu)

- Krystalizační zárodky dle Le Chateliera
- První podíly C-S-H gelu,
- Žádné vizuální změny
- 5–6 hodin (konec tuhnutí)

#### C. Třetí stádium (vysoké hydratační rychlosti)

- Intenzivní vznik gelů a krystalické fáze,
- 3–5 dnů

#### D. Čtvrté stádium (nízké hydratační rychlosti)

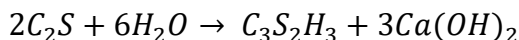
- Řídicím dějem je difuze vody do vnitřní části slínekových zrn

- 28 dnů

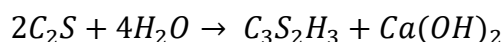
#### E. Páté stádium (dozrávání struktury)

- Gelová forma, ze které se po čase oddělují krystaly, krystalizuje během několika let

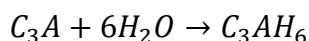
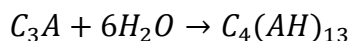
##### 1. Hydratace alitu



##### 2. Hydratace belitu



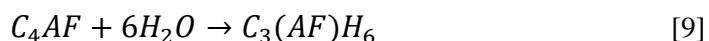
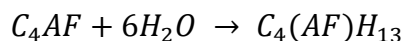
##### 3. Hydratace trikalciumaluminátu



C4AH13 vzniká za normálních podmínek,

C3AH6 vzniká konverzí z C4AH13 za desítky let, případně bezprostředně v autoklávu.

##### 4. Hydratace brownmilleritu



### 8.2.2 Další složky

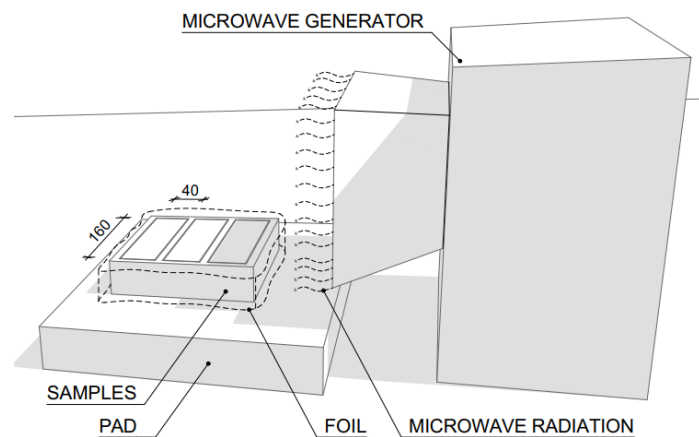
Jako plnivo byl využit normalizovaný písek CEN. k hydrataci byla využita voda. Složení jednotlivých záměsí bylo následující:

- jeden hmotnostní díl cementu ( $450 \pm 2$ g),
- tři hmotnostní díly normalizovaného písku CEN ( $3 \times 450$  g =  $1350 \pm 5$  g),
- půl dílu vody ( $225 \pm 1$  g),
- (vodní součinitel voda/cement 0,50).<sup>62</sup>

### 8.3 Využití zařízení – generátor mikrovlnného záření

Ve stavební praxi se v současné době používá několik typů EMW záření pro vysoušení vlhkých stavebních konstrukcí. Mnoho zařízení vysouší zdivo pouze připojením generátoru EMW s magnetronem, ale použití antén EMW zefektivňuje vysoušení. Základní metody vysoušení ve stavební praxi využívají prutovou nebo trychtýřovitou EMW anténu<sup>1</sup>. v tomto experimentu byla použita pouze trychtýřovitá anténa. Při vysoušení bylo zařízení vybavené trychtýřovitou anténou připevněno ke zdivu ve vzdálenosti 0 až 50 mm a ponecháno v činnosti po určitou dobu na libovolném místě. Postupným cyklickým přemisťováním antény se dosáhlo vysušení celé plochy. Důležité je vysušovat místa vícekrát, protože jinak může dojít při rychlém vysoušení k vytvoření podpovrchových kapes, v důsledku čehož se vysuší pouze povrch zdiva a vlhkost zůstane v hloubce materiálu. Cyklické vysoušení zabráňuje vzniku kapes a zajišťuje ohřev v hloubce materiálu.

V tomto experimentu byl k ozařování cihel použit přenosný mikrovlnný generátor Romill, G1/2011. Použité napětí bylo 230 V, 50 Hz, příkon 1,5 kW, frekvence mikrovln 2450 MHz a maximální mikrovlnný výkon 1 kW.<sup>54</sup>



Obrázek 25. Schéma sestavy mikrovlnného generátoru pro ozařování<sup>54</sup>

## 8.4 Materiály a metody

Experimentální program proběhnul na několika vzorcích betonu. Kvůli transparentnosti a reprodukovatelnosti jednotlivých experimentů byla směs, která tvořila výsledný beton, vždy stejná. Konkrétně se jednalo o směs, kde byla pojivová složka cement CEM I 42,5 R, plnivo byl sklářský písek a voda. Zastoupení jednotlivých složek směsi bylo v poměru 1:3:0.5.

Hlavním cílem experimentu bylo zjistit vliv působení mikrovlnného záření na čerstvý beton při jeho tuhnutí a tvrdnutí.

Celkem bylo vytvořeno 24 vzorků této směsi, které byly uloženy do ocelových a silikonových forem o vnitřním rozměru 40 x 40 x 160 mm. 24 vzorků tuhlo a tvrdlo standardním způsobem v ocelových formách na vzduchu a 24 vzorků bylo vystaveno působení mikrovlnného záření.

Na 12 z těchto 24 vzorků působilo mikrovlnné záření při tuhnutí čerstvé směsi celkem 30 min a na dalších 12 vzorků působilo mikrovlnné záření po dobu 60 min. Vzorky byly umístěny od generátoru mikrovlnného záření 30 cm, jak je uvedeno v následujícím obrázku.

Tyto vzorky byly dále uloženy ve vodní lázni po dobu 7, 14 a 28 dnů a následně byly provedeny pevnostní zkoušky – pevnost v tlaku a v tahu, zjištění nasákavosti a objemové hmotnosti.

Dále bylo vytvořeno 6 vzorků čerstvých směsí uloženo do kruhových nádob o průměru 80 mm a hloubce 10 mm. 3 z těchto vzorků tuhly a tvrdly standardním způsobem na vzduchu, 3 vzorky byly vystaveny působení mikrovlnného záření. u těchto vzorků bylo po 30 min pomocí lihu zastaveno tuhnutí a byly vystaveny DTA analýze. Cílem bylo zjistit zastoupení jednotlivých slinkových minerálů ve směsích a najít rozdíly při tuhnutí oběma způsoby.

Jednotlivé suroviny byly dávkovány a míchány podle pevně stanoveného postupu. Nejprve bylo vysušeno kamenivo, poté naváženy jednotlivé komponenty, tak aby bylo zajištěn beton, který bude mít stejné vlastnosti pro všechny směsi. Navážené komponenty byly dávkovány do míchačky s nuceným oběhem v pořadí kamenivo a cement. Tato směs se míchala po dobu 90 sekund, což zajistilo vysokou homogenitu suché složky.

Po zhomogenizování směsi byla dávkována záměsová voda.

Čerstvý beton byl ukládán do forem, které byly vytřeny separačním přípravkem pro snadnější odformování.) Byly použity celkem dva typy forem o vnitřních rozměrech 40 x 40 x 160 mm, a to ocelová a silikonová. Hutnění betonu probíhalo pomocí vibrace – byl využit střešací vibrační stolek pro trámčové trojformy. Celkem bylo vytvořeno 48 vzorků této směsi, které byly uloženy do ocelových a silikonových forem o vnitřním rozměru 40 x 40 x 160 mm.

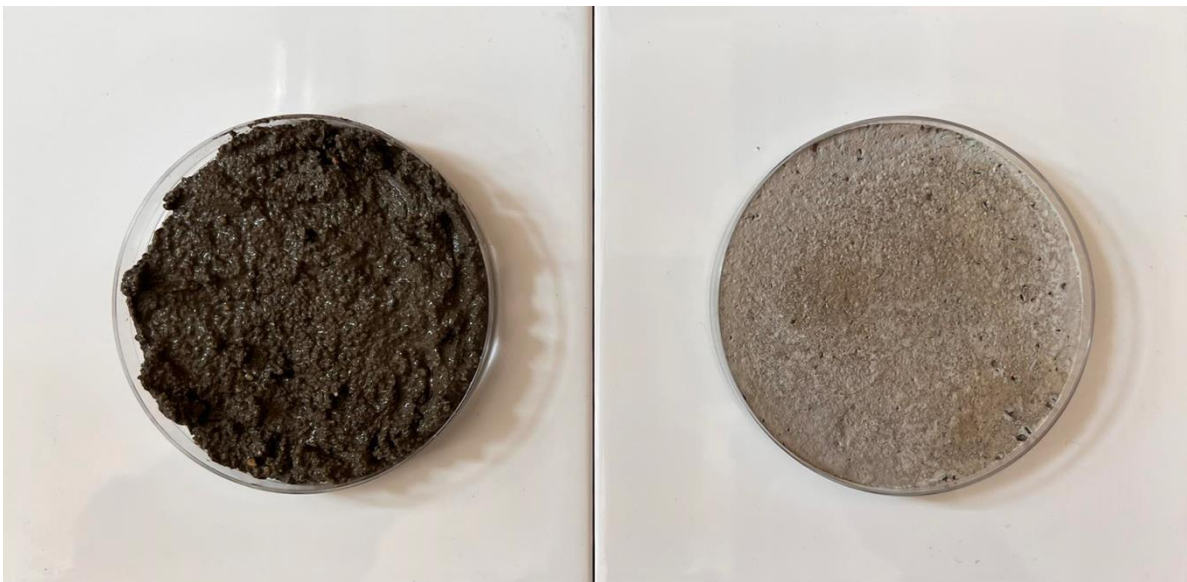
24 vzorků tuhlo a tvrdlo standardním způsobem v ocelových formách na vzduchu a 24 vzorků bylo vystaveno působení mikrovlnného záření.

Na 12 z těchto 24 vzorků působilo mikrovlnné záření při tuhnutí čerstvé směsi celkem 30 min a na dalších 12 vzorků působilo mikrovlnné záření po dobu 60 min. Vzorky byly umístěny od generátoru mikrovlnného záření 30 cm a 50 cm, jak je uvedeno v obrázku 25.<sup>56</sup>

Odformování těles probíhalo vždy do 24 hodin od uložení betonu do forem, tělesa byla čitelně označena a uložena do prostředí ve kterých byla ošetřována. Pro betony byl zvolen jeden společný způsob ošetřování, uložení těles do vodní lázně o teplotě 20 °C.

Na obrázku 26 vidíme vzorek betonu, který tuhnul 30 min standardním způsobem a na obrázku 27 vidíme beton, který tuhnul s využitím mikrovlnného záření.

Na obrázku 28 vidíme vzorek betonu, který tuhnul 60 min standardním způsobem a na obrázku 29 vidíme beton, který tuhnul s využitím mikrovlnného záření.<sup>54</sup>



Obrázek 26 Fotografie vzorku betonu v kruhové misce, který tuhnul standardním způsobem po 30 minutách tuhnutí<sup>54</sup>

Obrázek 27 Fotografie vzorku betonu v kruhové misce, který byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 30 min<sup>54</sup>



Obrázek 28 Fotografie vzorku betonu v kruhové misce, který tuhnul standardním způsobem po 60 minutách tuhnutí<sup>54</sup>

Obrázek 29 Fotografie vzorku betonu v kruhové misce, který byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 60 minut<sup>54</sup>

## 8.5 Postup experimentálních prací

Z důvodu vzájemného porovnání vlastností jednotlivých betonů byly u všech betonů zvoleny stejné zkušební metody a postupy. Celkový soubor experimentálních prací lze rozdělit do dvou částí.

První část zkoušek byla zaměřena na stanovení zastoupení slinkových minerálů v betonu při tuhnutí.

Celkem bylo vytvořeno 6 vzorků čerstvých směsí uloženo do kruhových nádob o průměru 80 mm a hloubce 10 mm. 3 z těchto vzorků tuhly a tvrdly standardním způsobem na vzduchu, 3 vzorky byly vystaveny působení mikrovlnného záření. u těchto vzorků bylo po 30 min pomocí lihu zastaveno tuhnutí a byly vystaveny DTA analýze. Cílem bylo zjistit zastoupení jednotlivých slinkových minerálů ve směsích a najít rozdíly při tuhnutí oběma způsoby.

Druhá část zkušebních metod se týká ztvrdlého betonu, přesněji stanovení fyzikálně mechanických vlastností ztvrdlého betonu.

Pevnost v tlaku u betonů se stanovovala na trámčích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm na zlomcích těles po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu.<sup>54</sup>

### **8.5.1 Uložení ve vodní lázni**

Základním způsobem ošetřování byla vodní lázeň. Zkušební tělesa byla po odformování pečlivě a čitelně označena a poté uložena do nádoby s pitnou vodou, která byla umístěna v temperované laboratoři. Voda měla stálou teplotu  $20 \pm 2$  °C. Zkušební vzorky byly v této lázni uloženy až do doby, kdy byly vyjmuty, povrchově osušeny a podrobeny fyzikálně mechanickým zkouškám.<sup>54</sup>

### **8.5.2 RTG**

K rentgenové strukturní analýze byl použit rentgenový difraktometr Empyrean se zdrojem monochromatického rentgenového záření CuK alfa s filtrací záření Ni. Příprava vzorků spočívala v přerušení mechanismu hydratace dehydratací vzorků a jejich rozmíchání v mlecí maltě na požadovanou jemnost fragmentace.<sup>54</sup>

### **8.5.3 Stanovení objemové hmotnosti (ČSN EN 12390-7)**

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se stanoví tak, že se u zkušebního tělesa stanoví objem na základě jeho rozměrů, a následně se zjistí jeho hmotnost. Příprava zkušebních těles, postup při zkoušce a vyhodnocení bylo provedeno dle příslušné normy ČSN EN 12390-7.<sup>61</sup>

### **8.5.4 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu (ČSN EN 13 892-2)**

Pevnost v tahu za ohybu se stanovila na trámečcích 40 x 40 x 160 mm umístěných symetricky na podpěry a rovnoměrně zatěžovaných hydraulickým lisem kolmo na směr hutnění. Hodnota pevnosti v ohybu byla vypočtena jako průměr ze tří stanovených hodnot.

U této zkoušky byla stanovena pevnost v tahu za ohybu po 7, 14 a 28 dnech.<sup>62</sup>

### **8.5.5 Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN EN 12 190), (ČSN EN 12 390-3)**

Pevnost v tlaku betonů se zkoušela na zlomcích zkušebních trámečků po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Zatěžování bylo vedeno kolmo na směr hutnění. Hodnota pevnosti v tlaku byla vypočtena jako aritmetický průměr hodnot stanovených na zlomcích zkušebních trámečků.

---

<sup>61</sup> ČSN EN 12390-7; Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2020.

<sup>62</sup> ČSN EN 12390-5; Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2020.

U této zkoušky byla stanovena pevnost v tlaku za ohybu po 7, 14 a 28 dnech.<sup>63</sup>

### **8.5.6 Stanovení nasákavosti betonu (ČSN EN 206+A2)**

Zkušební tělesa jsou zvážena a následně na 72 hodin vložena do sušárny o teplotě 105 °C. Po uplynutí požadované doby jsou tělesa vyjmuty a po ochlazení na teplotu místnosti opět zváženy. Tělesa jsou vložena do vany tak, aby se nedotýkaly. Dno je vyskládáno dvěma dřevěnými hranolky sloužící jako podpory pro každý trámec. Poté je vana zalita vodou, 2 cm nad horní povrch těles. v předem určených

časových intervalech po dobu 72 hodin jsou trámece z vody vyjmuty, osušeny vlhkou hadrou a zváženy. Po 72 hodinách jsou vzorky vloženy do hrnce s vařící vodou po dobu 4 hodin a poté se opět zváží. Přírůstky hmotnosti jsou zaznamenány do protokolu.<sup>64</sup>

## **8.6 Výsledky experimentů a diskuze**

Bylo navrženo a vyrobeno celkem 24 vzorků betonu, konkrétně se jednalo o trámece o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, na kterých proběhly pevnostní zkoušky, zkouška nasákavosti a stanovení objemové hmotnosti a dále bylo vytvořeno 6 vzorků čerstvých směsí uloženo do kruhových nádob o průměru 80 mm a hloubce 10 mm. 3 z těchto vzorků tuhly a tvrdly standardním způsobem na vzduchu, 3 vzorky byly vystaveny působení mikrovlnného záření.

Výsledné vlastnosti můžeme vidět v tabulce 9. Označení experimentu č. 1 znamená, že beton tuhnul a tvrdnul standardním způsobem na vzduchu.

Označení experimentu č. 2 znamená, že beton byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 30 minut a následně ihned odformován z formy a po ustálení na pokojovou teplotu byl uložen ve vodní lázni.

Označení experimentu č. 3 znamená, že beton byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 60 minut a následně ihned odformován z formy a po ustálení na pokojovou teplotu byl uložen ve vodní lázni.<sup>54</sup>

---

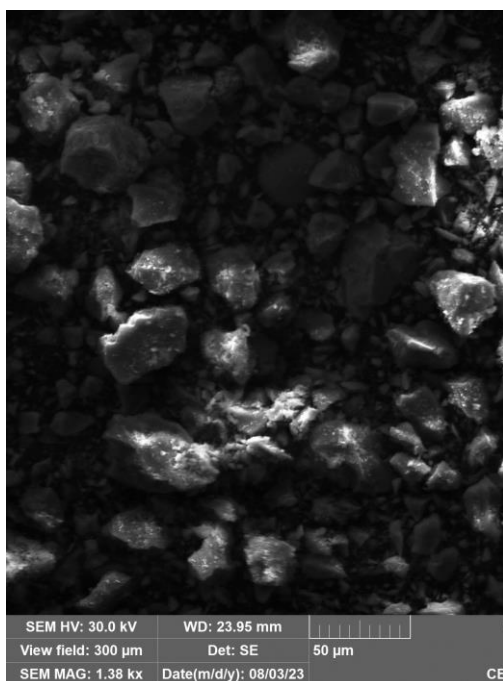
<sup>63</sup> ČSN EN 12 390-3; Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2020.

<sup>64</sup> ČSN EN 206+A2; Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2021.

Tabulka 9. Výsledné hodnoty objemové hmotnosti, pevnosti v tahu, pevnosti v tlaku a nasákavosti vzorků po 7, 14 a 28 dnech.<sup>54</sup>

Vlastnost		7 dnů	14 dnů	28 dnů
Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	Experiment 1	2000	1980	2070
	Experiment 2	2010	2040	1950
	Experiment 3	2050	2040	1960
Pevnost v tahu [MPa]	Experiment 1	2,5	2,9	3,7
	Experiment 2	1,8	2,1	3,8
	Experiment 3	1,3	1,4	3,6
Pevnost v tlaku [MPa]	Experiment 1	39	46,5	56,5
	Experiment 2	29,8	36	49
	Experiment 3	17,3	27,5	38
Nasákavost [%]	Experiment 1	9,62	8,56	8,96
	Experiment 2	7,86	9,06	10,59
	Experiment 3	9,26	9,18	10,18

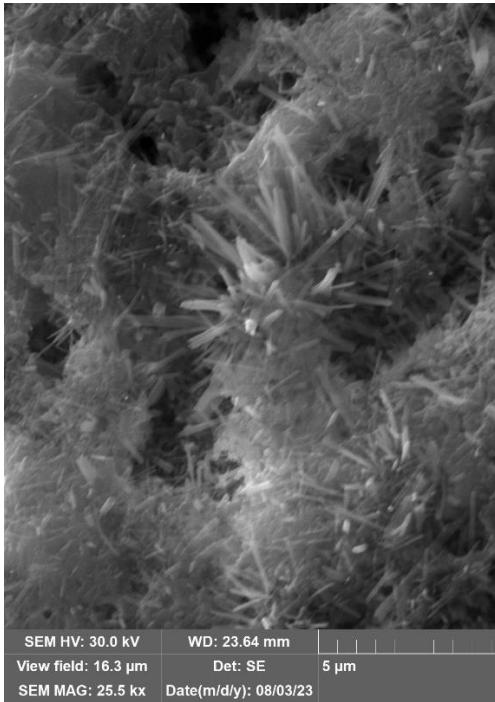
### 8.6.1 Zobrazení vzorků pod elektronovým mikroskopem



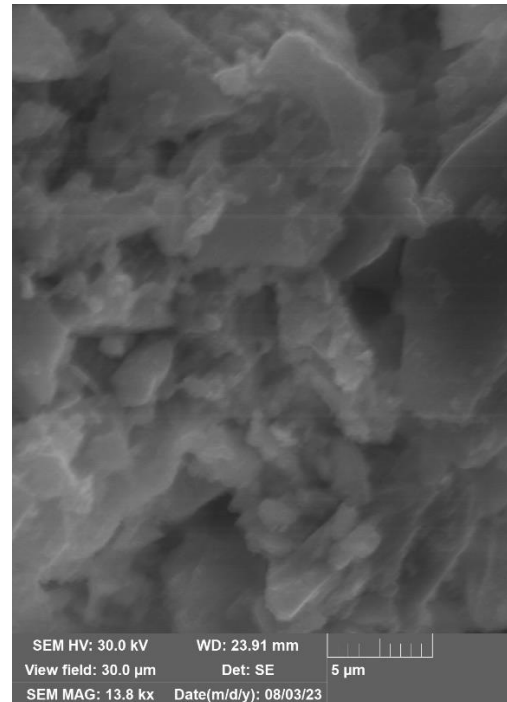
Fotografie 30 zobrazení cementu po 30 min hydratace na vzduchu<sup>54</sup>



Fotografie 31 zobrazení cementu po 30 min expozice mikrovlnným zářením<sup>54</sup>

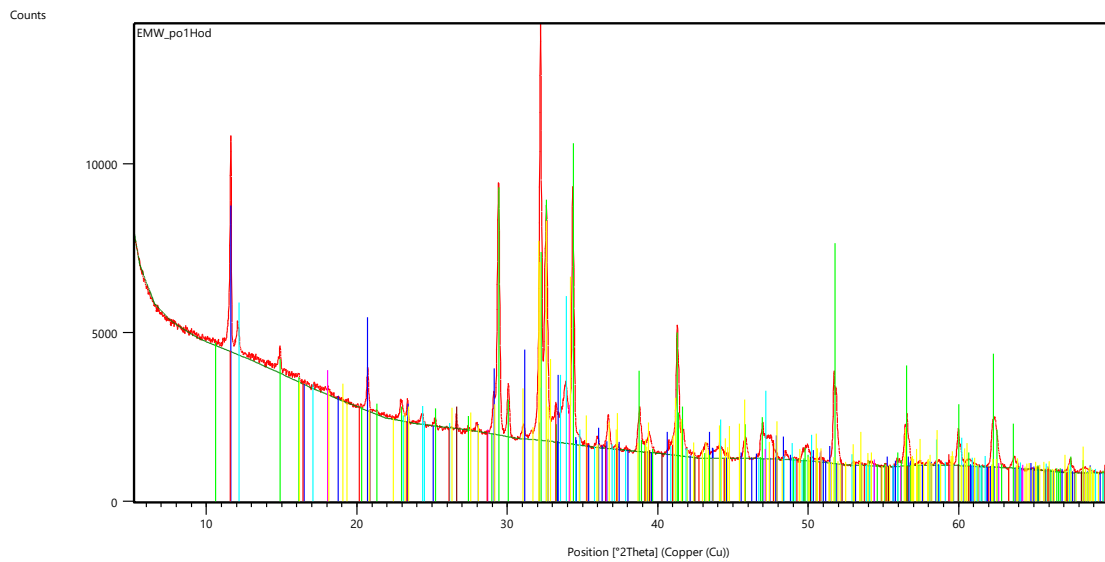


Fotografie 32 zobrazení cementu po 60 min hydratace na vzduchu<sup>54</sup>



Fotografie 33 zobrazení cementu po 60 min expozice mikrovlnným zářením<sup>54</sup>

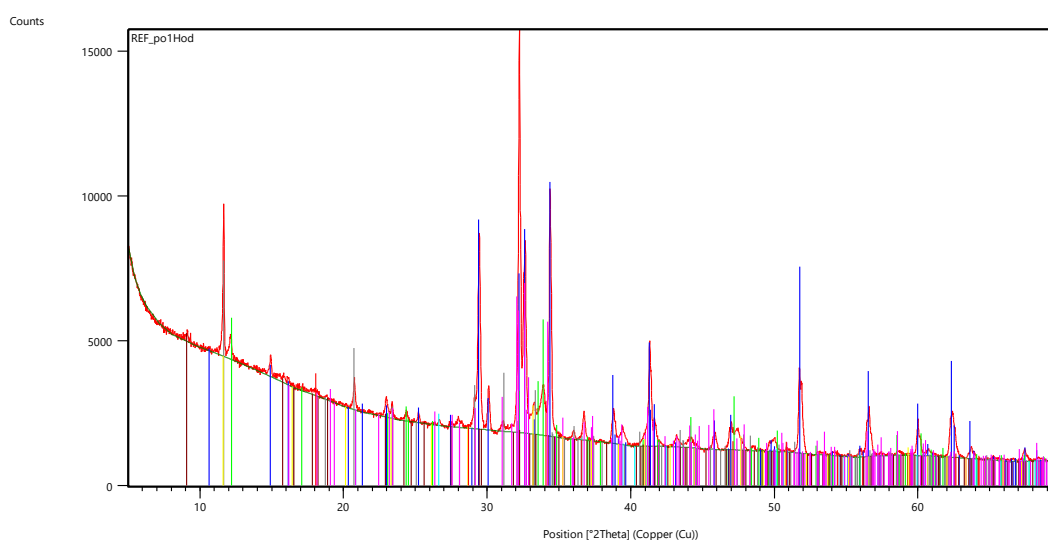
## 8.6.2 DTA, RTG analýzy



Obrázek 34. Rentgenový snímek vzorků C-S-H gelu, který byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 60 minut.<sup>54</sup>

Tabulka 10. Vzniklé minerály, které byly zjištěny pomocí rentgenové analýzy ve vzorku C-S-H gelu, který byl vystaven mikrovlnnému záření po dobu 60 min.<sup>54</sup>

Zobrazovaná barva	Název mineralu	Chemical Formula
Modrá	Hatrurite	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
Lime	Brownmillerit	Ca <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> )O
Šedá	Sádrovec	SiO <sub>2</sub>
Bordó	Ettringit	Al <sub>0.95</sub> Ca <sub>2</sub> Fe <sub>0.95</sub> Mg <sub>0.05</sub> O <sub>5</sub> Si <sub>0.05</sub>
Aqua	Křemen nízký	Ca(OH) <sub>2</sub>
Fuksiová	Larnit	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Žlutá	Dialuminát trikalcia	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Červená	Portlandit	



Obrázek 35. Rentgenový snímek vzorku gelu C-S-H, který nebyl vystaven mikrovlnnému záření.<sup>54</sup>

Tabulka 11. Vzniklé minerály, které byly zjištěny rentgenovou analýzou ve vzorcích C-S-H gelu, který nebyl vystaven mikrovlnnému záření.<sup>54</sup>

Zobrazovaná barva	Název mineralu	Chemický vzorec
Modrá	Hatrurite	Ca <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> )O
Lime	Brownmillerit	Al <sub>0.95</sub> Ca <sub>2</sub> Fe <sub>0.95</sub> Mg <sub>0.05</sub> O <sub>5</sub> Si <sub>0.05</sub>
Šedá	Sádrovec	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
Bordó	Ettringit	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .(OH) <sub>12</sub> .26H <sub>2</sub> O
Aqua	Křemen nízký	SiO <sub>2</sub>
Fuksiová	Larnit	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Žlutá	Dialuminát trikalcia	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Červená	Portlandit	Ca(OH) <sub>2</sub>

### 8.6.3 Diskuze k výsledkům

#### 8.6.3.1 Objemová hmotnost

Při pohledu na hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu, nevykazují výsledky výrazné rozdíly.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu byla stanovena ve stáří vzorků 7, 14 a 28 dnů.

Tato zkouška byla prováděna dle ČSN EN 12390-7 na trámečcích 40 x 40 x 160 mm, a předcházela zkoušce v tlaku. Zkušební tělesa byla před zkouškou uložena ve vodním prostředí. Výsledky a průběhy objemových hmotností v čase všech betonů jsou zobrazeny v grafu 11.<sup>56</sup>



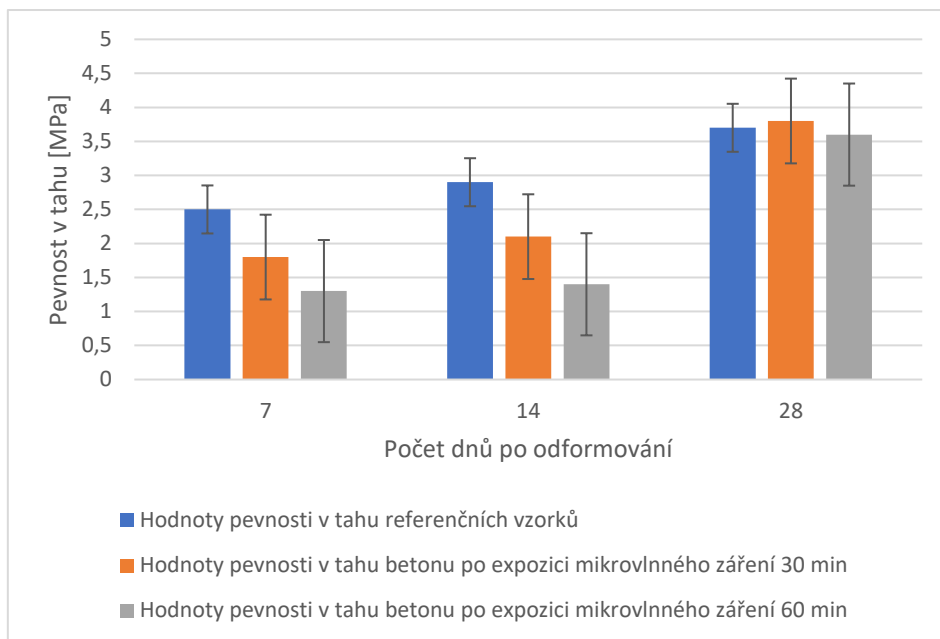
Obrázek 36. Hodnoty objemové hmotnosti vzorků po 7, 14 a 28 dnech od odformování.<sup>54</sup>

#### 8.6.3.2 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu ztvrdlého betonu byla stanovena ve stáří vzorků 7, 14 a 28 dnů.

Tato zkouška byla prováděna dle ČSN EN 12390-5 na zkušebních trámečcích 40 x 40 x 160 mm, a předcházela zkoušce v tlaku. Zkušební tělesa byla před zkouškou uložena ve vodním prostředí a následně vysušena v sušárně při 105 °C. Pevnosti v tahu jednotlivých vzorků v čase všech betonů jsou zobrazeny v tabulce.

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že po 7 dnech a 14 dnech má nejvyšší pevnost v tahu referenční vzorek, ale po 28 dnech jsou výsledky pevnosti v tahu srovnatelné s rozdílem do 3 %.<sup>54</sup>



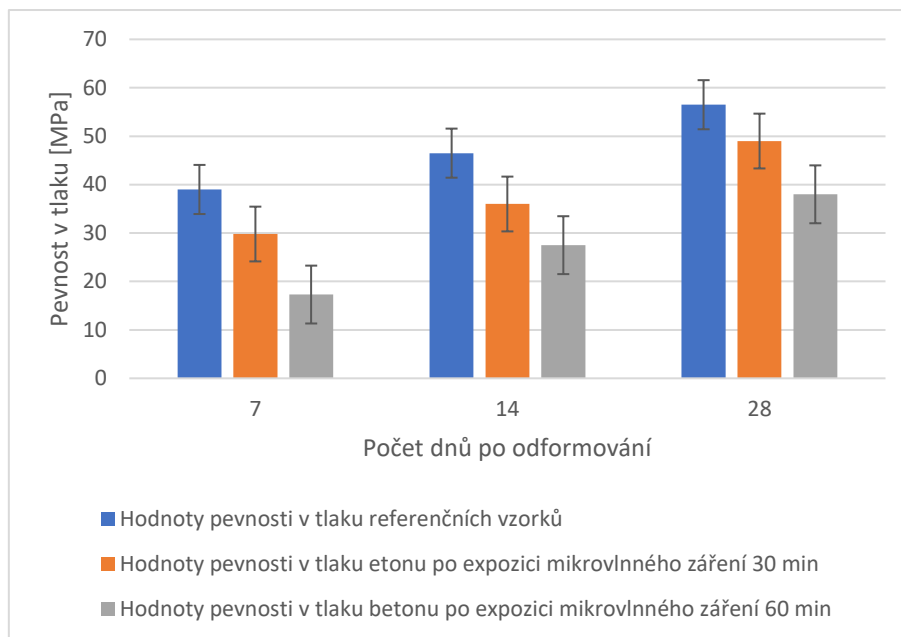
Obrázek 37. Hodnoty pevnosti v tahu vzorků po 7., 14. a 28. dnech od odformování.<sup>54</sup>

### 8.6.3.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku ztvrdlého betonu byla stanovena ve stáří vzorků 7, 14 a 28 dnů.

Tato zkouška byla prováděna dle ČSN EN 12390-5 na úlomcích zkušebních trámečků 40 x 40 x 160 mm, a proběhla po zkoušce v tahu. Zkušební tělesa byla před zkouškou uložena ve vodním prostředí a následně vysušena v sušárně při 105 °C. Pevnosti v tahu jednotlivých vzorků v čase všech betonů jsou zobrazeny v tabulce.

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že po 7 dnech, 14 dnech i po 28 dnech má nejvyšší pevnost v tlaku referenční vzorek. Je zde zachován trend, kdy má vždy nejvyšší pevnost referenční vzorek a každé další delší působení mikrovlnného záření na beton má negativní dopad na výslednou pevnost v tlaku.<sup>54</sup>



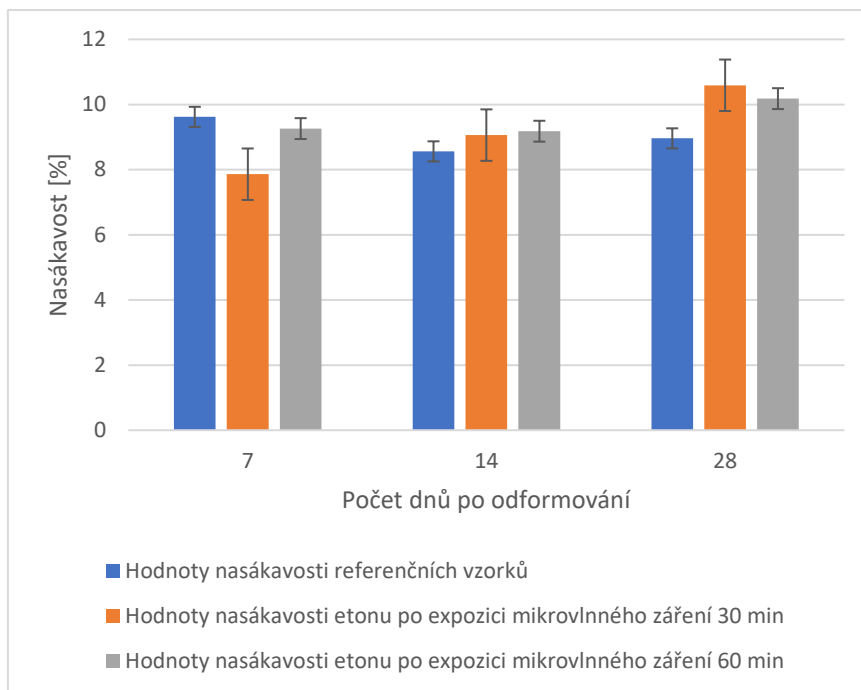
Obrázek 38. Hodnoty pevnosti v tlaku vzorků po 7, 14 a 28 dnech od odformování.<sup>54</sup>

#### 8.6.3.4 Nasákavost

Nasákavost ztvrdlého betonu byla stanovena ve stáří vzorků 7, 14 a 28 dnů.

Tato zkouška byla prováděna dle ČSN EN 12390-5 na trámečcích 40 x 40 x 160 mm, a předcházela zkoušce v tahu. Zkušební tělesa byla před zkouškou uložena ve vodním prostředí a následně vysušena v sušárně při 105 °C, následně byla tělesa zvážena a uložena do vodního prostředí na 24 hodin a opět zvážena. Hodnoty nasákavosti jednotlivých vzorků v čase všech betonů jsou zobrazeny v tabulce.

Ze zjištěných hodnot vyplývá, že po 28 dnech má nejnižší hodnotu nasákavosti referenční vzorek.<sup>54</sup>

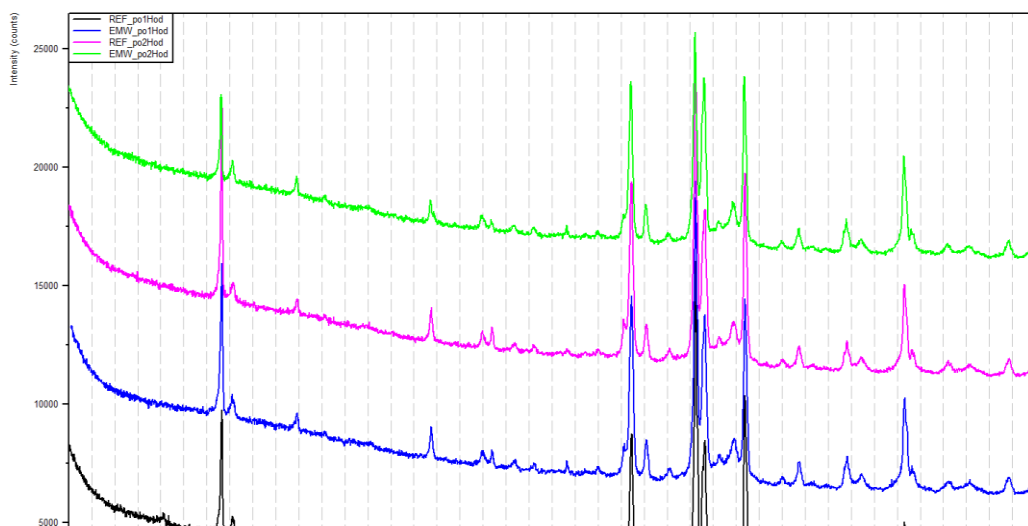


Obrázek 39. Hodnoty objemové hmotnosti vzorků po 7, 14 a 28 dnech od odformování.<sup>54</sup>

### 8.6.3.5 Vyhodnocení rentgenové analýzy

Z pořízených rentgenogramů je zřejmé, že použité pojivo byl silikátové – cement na bázi portlandského slínku, systému  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ , bez významného zastoupení minoritních složek. Analýza zachycuje pouze přítomnost krystalických fází, sklovité fáze nelze touto rentgenovou difrakční metodou zachytit.

V počáteční fázi je proces hydratace ovlivněn MW napětím, které způsobuje zvýšení teploty vody přítomné v okolí cementových zrn, konkrétně rychlost hydratace uplatňující se reakční kinetikou na povrchu cementových zrn. z přesyceného roztoku se vysrážejí krystaly ettringitu a hydroxidu vápenatého. z průběhu rentgenogramů je patrné, že se netvoří žádné neočekávané krystalické fáze. Vliv MW záření ovlivňuje reakční kinetiku hydratace v její počáteční fázi.<sup>54</sup>



Obrázek 40. Zobrazení jednotlivých experimentů na jednom snímku.<sup>54</sup>

Rychlost hydratace a množství uvolněného hydratačního tepla závisí na řadě faktorů, ale rozhodující vliv má především mineralogické složení cementu. Rychlost hydratace závisí na době smíchání cementu s vodou; později s časem klesá. Je známo, že poměr alitu a belitu může ovlivnit nárůst pevností a vývoj hydratačního tepla v různých fázích hydratace. Za faktory ovlivňující hydrataci lze považovat také stáří cementového kamene a hodnotu měrného povrchu cementových zrn, protože například u hrubozrnných cementů je hloubka hydratace malá vzhledem k největší velikosti zrn slínku.<sup>54</sup>

## 8.7 Závěr

Na základě provedených experimentů a jejich následného vyhodnocení nelze zcela potvrdit tvrzení Dr. Swee Lianga Maka a výsledky jeho experimentu LEAP, který uvádí, že pevnosti v tlaku jsou srovnatelné u referenčních vzorků betonu, které byly vytvrzeny standardním způsobem na vzduchu, a u vzorků, které byly vystaveny mikrovlnnému záření.<sup>43</sup>

Experiment byl proveden ve třech sadách. v první sadě byly použity vzorky betonu, které byly vytvrzeny standardním způsobem na vzduchu. Ve druhé sadě byly vzorky betonu vystaveny mikrovlnnému záření po dobu 30 minut. Ve třetí sadě byly vzorky betonu vystaveny mikrovlnnému záření po dobu 60 minut.

Zatímco výsledné pevnosti v tahu betonových vzorků jsou po 28 dnech u všech experimentů srovnatelné, po 7 a 14 dnech lze pozorovat trend, kdy pevnost v tahu čerstvého betonu klesá s rostoucí dobou vystavení mikrovlnnému záření.

U výsledných pevností v tlaku pozorujeme tento trend u všech vzorků.

Příčinu tohoto rozdílu ve vlastnostech nacházíme ve vyšší teplotě, které byl beton vystaven, přesně jak uvádí Namarak a kolektiv<sup>52</sup> a také Ezziane a kolektiv.<sup>53</sup>

Hodnoty objemové hmotnosti a absorpce lze u všech vzorků považovat za srovnatelné a obecně nelze výsledný vliv mikrovlnné expozice na tyto vlastnosti vzorků jednoznačně určit.

Rentgenová analýza ukazuje, že vzorky obsahují stejné minerály a v přibližně stejném poměru. Obecně nelze říci, že by mikrovlnná expozice měla vliv na zastoupení jednotlivých slídkových minerálů při hydrataci C-S-H gelu.

Výhodou mikrovlnného ohřevu obecně je, že k ohřevu vlhkosti obsažené v porézním systému stavebního materiálu dochází přímo v materiálu; děje se tak prostřednictvím absorpce mikrovlnného záření vlhkostí. Při mikrovlnném ohřevu je dosaženo manipulační pevnosti v relativně krátkém čase a proces výroby betonových dílců lze urychlit.

K dalším výhodám patří, že mikrovlnný ohřev přímo ve stavebním materiálu je rychlý; že mikrovlnné sušení lze aplikovat na širokou škálu stavebních materiálů; a že mikrovlnné zářiče jsou mobilní a snadno ovladatelné.

Mezi nevýhody patří například to, že náklady na pořízení mikrovlnného generátoru jsou vyšší; že mikrovlnné záření je zdraví škodlivé, a proto není vhodné, aby se nacházelo v blízkosti ozařovaného materiálu; a že není možné kontinuální měření teploty v ozařovaném materiálu, protože teplotní čidla jsou na bázi kovů, takže interagují s mikrovlnným zářením.<sup>54</sup>

## 9 Experimentální program 2

### 9.1 Vysoušení vlhkosti ze stavebních hmot

Řešení vlhkosti ve stavebních konstrukcích je jedním z nejaktuálnějších témat ve stavebnictví. Existuje celá řada metod, jak zabránit pronikání vlhkosti do konstrukcí a jak vlhkost ze stavebních materiálů skutečně odstranit. Tyto metody lze dnes považovat za poměrně účinné, je však nutné je dále rozvíjet a přicházet s ekonomičtějšími a zejména ekologičtějšími řešeními. Problémy s vlhkostí ve stavebních materiálech jsou obzvláště závažné, protože voda v nich obsažená výrazně ovlivňuje jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. v současné době se v České republice a obecně v Evropě používá více metod odstraňování vlhkosti ze stavebních materiálů, které splňují většinu požadavků dnešní stavební praxe.

Základními kritérii pro jejich použití jsou rychlost a účinnost sušení, ekonomická náročnost procesu, náklady na potřebné vybavení a celková šetrnost metody k životnímu prostředí. Běžně používané metody sušení stavebních materiálů jsou účinné, ale doba sušení může být poměrně dlouhá a jejich použitelnost a vhodnost závisí na druhu stavebního materiálu.

Jedním z přístupů k sušení stavebních materiálů je použití mikrovlnného záření. Tato metoda je známa přibližně od roku 1945, ale ve stavební praxi se v současné době stále ještě příliš nepoužívá. Důvodem jsou vyšší pořizovací náklady mikrovlnných generátorů a neznalost základních principů mikrovlnného sušení, což souvisí i s obavami o zdraví při vystavení tomuto typu záření. Kombinace těchto důvodů spolu s nízkou informovaností o této metodě vede k omezenému zájmu o využívání mikrovlnného záření ve stavební praxi.<sup>65</sup>

### 9.2 Využití materiály

#### 9.2.1 Cihla plná pálená

Plně pálené cihly jsou vhodné pro standardní nosné a výplňové omítnuté zdivo. Keramický materiál je poměrně pórovitý, křehký, tvrdý, nerozpustný ve vodě, chemicky odolný a žáruvzdorný. Je špatným tepelným vodičem a dobrým elektrickým izolantem. Vyrábí se vypalováním přírodní suroviny na bázi jílu (oxidové keramiky), čímž vzniká velmi tuhý materiál s dobrou odolností vůči vysokým teplotám.

---

<sup>65</sup> Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Venkrbec, V. Effect of Microwave Radiation on the Compressive Strength of Solid Ceramic Brick. *Buildings* 2023, 13, 1018. <https://doi.org/10.3390/buildings13041018>

Fyzikální vlastnosti keramických cihel byly stanoveny technickými normami. Požadovaná pórovitost byla minimálně 10 % a hodnota pevnosti v tlaku cihel byla klíčovým parametrem pro stanovení nosnosti zdiva.

Suroviny pro výrobu cihel se skládají z částic zvětralých hornin, zejména žuly, gneisu a porfyru. Produkty zvětrávání hornin jsou hlína, bahno, písek a různé příměsi. Nejdůležitější složkou je jíl, konkrétně jílové minerály jako illit, montmorillonit a kaolinit. z chemického hlediska se jedná o hydratované křemičitany hliníku s charakteristickou vrstevnatou strukturou.<sup>66</sup>

### 9.2.1.1 Výroba cihel

Nejprve se natěží cihlářská hlína, která se dále dopravuje buďto úzkokolejnými vozíky nebo nákladními automobily, případně lanovými dráhami do zásobníku (tzv. hliník neboli hlinišť), v němž se natěžená zemina drtí. v současné době se navíc části přidávají pomocné lehčící a ostřící suroviny (např. nižší objemová hmotnost, lepší tepelně izolační vlastnosti, nižší vypalovací teplota, apod.), jako jsou například piliny apod. Poté se celá směs mele, drtí a mísí a směruje do lisu, který protlačováním vytváří souvislý pás hmoty. Ten se rozřezává pomocí řezacích drátů a vznikají první cihlářské tvárnice. Ty dále směřují do sušáren, kde jsou vysušeny na obsah vlhkosti maximálně 2 %. Po 2–3 dnech v sušárně směřují do vypalovací pece, kde se vypalují jeden až dva dny. Nakonec následuje roztřídění dle přesnosti rozměrů, skladování (většinou na paletách, 250–300 cihel/paleta) a expedice. Některé cihlářské výrobky se ještě povrchově upravují, impregnují nebo opatřují nepropustnou glazurou.<sup>67</sup>

### 9.2.1.2 Vlastnosti cihel

- Dobrá pevnost při relativně nízké hmotnosti.
- Vysoká schopnost akumulace tepla.
- Klasický modulový formát.
- Ekologická nezávadnost (přírodní materiál).
- Dobré zvukově izolační vlastnosti a vysoká požární odolnost.
- Špatné tepelně izolační vlastnosti (u plných cihel).
- Estetický vzhled, tradiční cihla může být použita bez omítky jako rezné zdivo.<sup>70</sup>

<sup>66</sup> ANOTKA, Miroslav; LINHART, Karel. *Řemesla našich předků*. 1.. vyd. Praha: Nakladatelství Svoboda, 1987. 208 s. 25-105-87. S. 141–145.

<sup>67</sup> VOBODA, Luboš. *Stavební hmoty (volně dostupná elektronická kniha)*. [s.l.]: [s.n.], 2013. 950 s. [Dostupné online. ISBN 978-80-260-4972-2. Archivováno](#) 16. 10. 2013 na [Wayback Machine](#)

### 9.2.1.3 Technické údaje

Skutečné rozměry	290 × 140 × 65 mm
Konstrukční rozměr (s omítkou a maltou)	300 × 150 × 75 mm
Hmotnost	4,7 kg/ks
Objemová hmotnost	1900 kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tlaku	15–80 MPa
Nasákavost	15 % <sup>68</sup>

### 9.2.2 Využití zařízení – generátor mikrovlnného záření

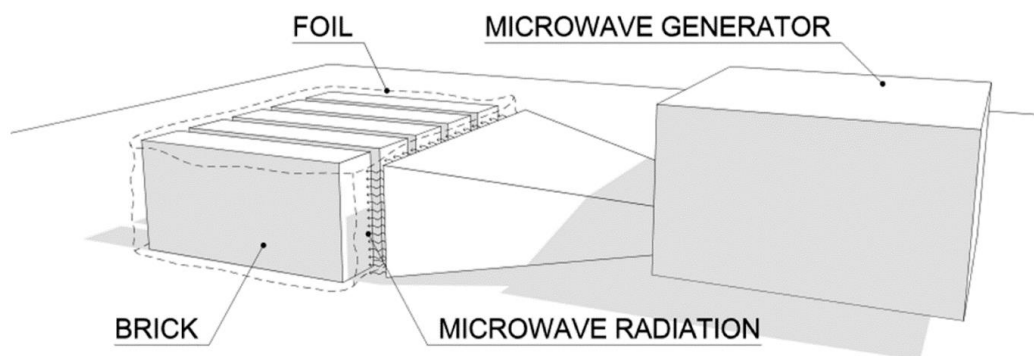
Ve stavební praxi se v současné době používá několik typů EMW záření pro vysoušení vlhkých stavebních konstrukcí. Mnoho zařízení vysuší zdivo pouze připojením generátoru EMW s magnetronem, ale použití antén EMW zefektivňuje vysoušení. Základní metody vysoušení ve stavební praxi využívají prutovou nebo trychtýřovitou EMW anténu.<sup>1</sup> v tomto experimentu byla použita pouze trychtýřovitá anténa.<sup>67</sup>

Při vysoušení bylo zařízení vybavené trychtýřovitou anténou připevněno ke zdivu ve vzdálenosti 0 až 50 mm a ponecháno v činnosti po určitou dobu na libovolném místě. Postupným cyklickým přemísťováním antény se dosáhlo vysušení celé plochy. Důležité je vysušovat místa vícekrát, protože jinak může dojít při rychlém vysoušení k vytvoření podpovrchových kapes, v důsledku čehož se vysuší pouze povrch zdiva a vlhkost zůstane v hloubce materiálu. Cyklické vysoušení zabraňuje vzniku kapes a zajišťuje ohřev v hloubce materiálu.

V tomto experimentu byl k ozařování cihel použit přenosný mikrovlnný generátor Romill, G1/2011. Použité napětí bylo 230 V, 50 Hz, příkon 1,5 kW, frekvence mikrovln je 2450 MHz a maximální mikrovlnný výkon činí 1 kW.<sup>67</sup>

---

<sup>68</sup> Cihla plná Cihelna Zlín P20 290×140×65 mm. Online. DEK.cz. 2023. Dostupné z: [https://www.dek.cz/produkty/detail/4400818054-zopy-cihla-plna-p20-290x140x65?gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-fJ6gIvJ3ej49-t8Ncd6LKMCAUoEZT4WY1uIa62H\\_OO\\_WN9-3XRGLgaAoiuEALw\\_wcB](https://www.dek.cz/produkty/detail/4400818054-zopy-cihla-plna-p20-290x140x65?gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-fJ6gIvJ3ej49-t8Ncd6LKMCAUoEZT4WY1uIa62H_OO_WN9-3XRGLgaAoiuEALw_wcB)



Obrázek 41.7 Schéma uspořádání vzorků a zářiče mikrovlnného zařízení<sup>65</sup>

### 9.3 Materiály a metody

Experimentální stanovení základních charakteristik studovaného materiálu je uvedeno v následující kapitole. Je třeba poznamenat, že všechny zde uvedené experimenty byly provedeny na keramickém stavebním materiálu, konkrétně na plných pálených cihlách s označením P20. Účelem bylo experimentálně ověřit vliv sušení cihel mikrovlnným zářením na mechanické vlastnosti cihel.<sup>65</sup>

#### Základní charakteristiky:

- rozměry cihel byly  $290 \times 140 \times 65$  mm;
- cihly byly tvarovány lisováním;
- v experimentu bylo 10 vzorků cihel;
- objemová hmotnost byla průměrně  $1718 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- pevnost v tlaku byla 20 MPa, jak uvádí výrobce.
- Před měřením byly vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti.

Vlastní experiment je založen na ošetření 10 plně vodou nasáklých keramických cihel mikrovlnným zářením s různou dobou expozice cihel. První interval působení EMW záření byl 60 min, druhý interval byl 120 min a třetí interval byl 240 min.

Jednotlivé experimenty byly prováděny ve dvou variantách; v první variantě bylo EMW záření aplikováno pouze po dobu jednoho cyklu a ve druhé variantě po dobu deseti cyklů.

Následně byla použita ultrazvuková vlna a byla změřena její doba průchodu. Na základě těchto údajů byl stanoven odhad pevnosti v tlaku každé cihly.

Měření sledovaných parametrů byla vždy provedena před a po vystavení mikrovlnnému záření. Na obrázku 41 vidíme rozložení vzorků cihel a generátoru EMW.<sup>65</sup>

## 9.4 Postup experimentálních prací

Pro experimentální měření bylo připraveno celkem 10 vzorků. Vzorky byly skladovány v laboratorních podmínkách s řízenou teplotou vnitřního vzduchu v rozmezí 19,9 °C až 22,3 °C.

Postup provádění testu lze shrnout do sledu laboratorních činností.

Nejprve byly vzorky vysušeny v sušící komoře do konstantní hmotnosti při teplotě 100 °C. Poté byly zváženy a byly stanoveny jejich základní mechanické a fyzikální vlastnosti a porovnány s hodnotami deklarovanými výrobcem. Poté byly vzorky namočený do nádrže s vodou na 24 h. Následně byly opět zváženy a byly vypočteny hodnoty jejich nasákavosti a zdánlivé pórovitosti. v dalším kroku byly vzorky vysušeny pomocí mikrovlnného záření ve dvou sadách (pět vzorků bylo vystaveno mikrovlnnému záření pouze jednou a dalších pět vzorků bylo vystaveno 10 cyklům). v obou případech byl 1 vzorek ozařován po dobu 1 h, 2 vzorky po dobu 2 h a poslední 2 vzorky po dobu 4 h. Kolem vzorků byla vytvořena kovově stíněná komora zvaná Faradayova klec, aby se omezilo šíření mikrovlnného záření do okolí. Po expozici byly vzorky zváženy a poté vysušeny v sušící komoře do konstantní hmotnosti při teplotě 100 °C. Následně byla změřena rychlost šíření ultrazvukového impulzu a stanovena vypočtená pevnost v tlaku cihel. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 12.<sup>65</sup>

Tabulka 12. Zjištěné vlastnosti vzorků<sup>65</sup>

Číslo vzorku	Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	Nasákavost [%]	Pevnost v tlaku [MPa]	Zdánlivá pórovitost [%]
1	1,737	14,72	32,2	25,58
2	1,418	14,62	33,6	25,12
3	1,755	14,17	44,3	24,86
4	1,769	13,28	31,1	23,49
5	1,720	15,01	34,5	25,96
6	1,726	14,25	43,3	24,59
7	1,719	13,65	40,1	23,46
8	1,739	13,20	42,9	22,96
9	1,736	13,66	31,9	23,72
10	1,726	14,16	32,8	24,44

#### 9.4.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti cihel

Objemová hmotnost cihel byla stanovena podle normy ČSN 72 2603<sup>69</sup>, protože vzorky byly geometricky pravidelné. Sledovaná vlastnost vzorků cihel byla hodnocena v tzv. vzduchosuchém stavu v laboratorním prostředí.<sup>70</sup>

Nasákavost byla stanovena podle normy ČSN 72 2603.<sup>69</sup> Současně se stanovením objemové hmotnosti byla stanovena nasákavost a zdánlivá pórovitost vzorků<sup>70</sup>.

Ke kvantifikaci pevnosti cihel v tlaku byla použita korelace mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln a rychlostí šíření zvuku v materiálu.

#### 9.4.2 Měření rychlosti ultrazvukových pulzů

Experiment byl proveden měřením průchodu ultrazvukové vlny vzorky a byl proveden přímým sondováním vzorků. Pro měření doby průchodu ultrazvukového impulsu byl použit následující postup: po délce cihly bylo měření provedeno ve třech měřicích bodech, které byly rovnoměrně rozmístěny po měřené ploše. Skutečná měřicí frekvence sond byla zvolena 54 kHz, aby byla splněna podmínka  $a \geq 1,25\lambda$  (kde  $a$  je minimální rozměr vzorku v místě měření a  $\lambda$  je vlnová délka), a pojivem byl Sonogel, běžně používaný ve zdravotnictví. V každém bodě měření byla provedena tři měření doby průchodu ultrazvukového impulsu.

<sup>69</sup> SN 72 2603; *Skúšanie Tehliarskych Výrobkov. Stanovenie Hmotnosti, Objemovej Hmotnosti a Nasiakavosti*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 1979.

<sup>70</sup> Khestl, F. *Ceramics. Testing of Building Materials and Products*. Technical University of Ostrava: Ostrava, Czech Republic, 2010. Available online: [https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly\\_zkouseni](https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly_zkouseni)

Ultrazvuk je definován jako mechanická vibrace částic prostředí o frekvenci vyšší než 20 kHz. Pro zkoušení stavebních materiálů se obvykle používají sondy s frekvencí od 40 kHz do 150 kHz. Když se ultrazvuková vlna šíří prostředím, jeho částice vibrují v různých směrech vzhledem ke směru šíření vlny. Podle toho lze ultrazvukové vlny rozlišit na čtyři typy: podélné (částice média kmitají rovnoběžně se směrem šíření vlny), příčné (částice média kmitají kolmo ke směru šíření vlny), povrchové (šíří se po povrchu tlustých těles a neovlivňují objem média pod nimi) a deskové (tyto vlny vznikají v tenkém kovu, jehož tloušťka je podobná vlnové délce).<sup>71</sup>

Koncepce metody spočívá ve vysílání opakovaných ultrazvukových impulsů do materiálu vysílacím snímačem a následné detekci impulsů prošlých zkoumaným materiálem přijímacím snímačem, tj. měření časového intervalu, který uplyne při průchodu impulsu měřicí základnou. Měření lze provádět přímým, nepřímým a polopřímým sondováním. Měření prováděná metodou rychlosti ultrazvukových impulsů jsou ovlivněna několika faktory, a to vlhkostí, vadami ve struktuře zkoumaného materiálu, rozměry a tvarem vzorku, vlastní frekvencí sond a také způsobem akustické vazby mezi sondami a zkoumaným materiálem. Tyto faktory je nutné zohlednit při vývoji metodiky měření pro konkrétní materiály.<sup>73, 72</sup>

Existuje korelace pro predikci pevnosti v tlaku cihel na základě parametrů měřených metodou rychlosti ultrazvukových impulsů. Na základě výsledků experimentálních měření byl stanoven odhad pevnosti cihel v tlaku podle vzorce:

$$f_c = 10,754V - 0,5367V^2 + 6,1707 \text{ [MPa]} \quad |r = 0,698,$$

kde  $f_c$  je pevnost v tlaku cihly v MPa,

$V$  je rychlost šíření ultrazvukového impulsu v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

$r$  je korelační koeficient.<sup>71</sup>

## 9.5 Výsledky experimentů a diskuze

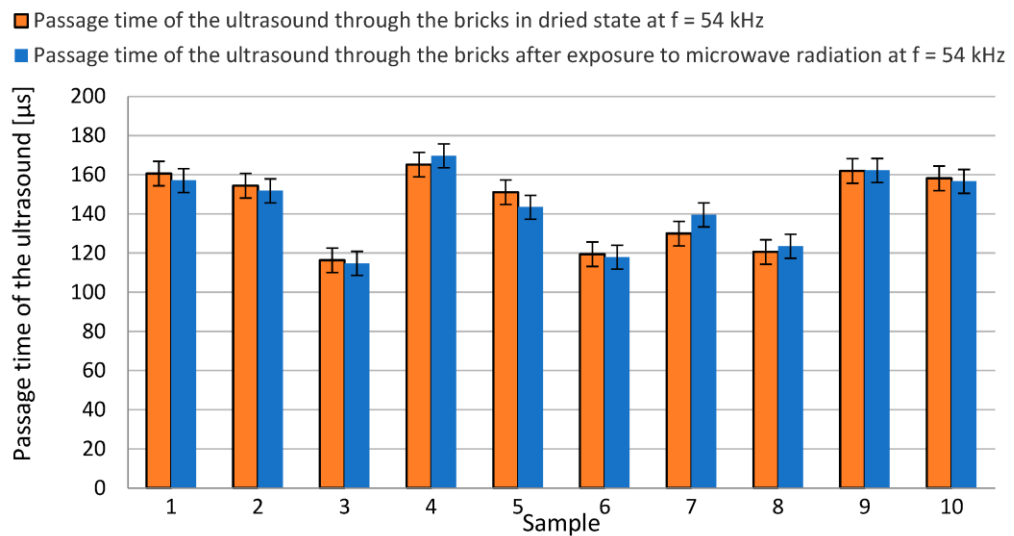
Analýza získaných výsledků poskytla poznatky o vhodnosti použití mikrovlnného záření pro vysoušení cihelných materiálů. Provedené experimenty potvrdily málo významný vliv mikrovlnného sušení na pevnost v tlaku porézního keramického materiálu.

---

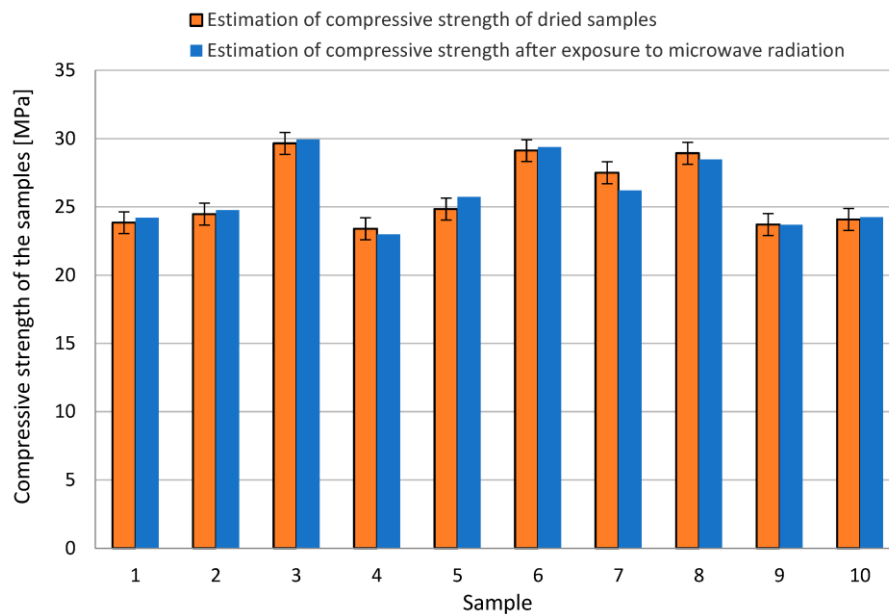
<sup>71</sup> Brožovský, J. *Use of the ultrasonic pulse method for detecting the compressive strength of different types of bricks (Využití ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování pevnosti v tlaku různých druhů cihel)*. TZB-Info 2018. Available online: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/17190-vyuziti-ultrazvukove-impulsove-metody-pro-zjistovani-pevnosti-v-tlaku-ruznych-druhu-cihel>

<sup>72</sup> Silva, F.A.N.; Delgado, J.M.P.Q.; Cavalcanti, R.S.; Azevedo, A.C.; Guimarães, A.S.; Lima, A.G.B. *Use of Nondestructive Testing of Ultrasound and Artificial Neural Networks to Estimate Compressive Strength of Concrete*. Buildings **2021**, *11*, 44.

Výsledky experimentů lze pozorovat v tabulkách 13 a 14 a výsledné doby šíření ultrazvukových vln jsou uvedeny v tabulce 15. Grafické znázornění výsledků lze vidět na obrázcích 42 a 43.<sup>65</sup>



Obrázek 42. Doba průchodu ultrazvukové vlny vzorky před a po expozici mikrovlnným zářením<sup>65</sup>



Obrázek 43. Odhad pevnosti v tlaku vzorků před a po expozici mikrovlnným zářením<sup>65</sup>

Tabulka 13. Výsledné vlastnosti vzorků po expozici mikrovlnným zářením po jednom cyklu<sup>65</sup>

Číslo vzorku	Doba expozice [h]	Hmotnost vysušeného vzorku [kg]	Hmotnost nasáklého vzorku [kg]	Hmotnost vzorku po vystavení mikrovlnnému záření [kg]
4	2	4,670	5,290	4,830
7	2	4,536	5,155	4,896
8	4	4,590	5,196	4,657
9	1	4,582	5,208	5,102
10	4	4,554	5,199	4,586

Tabulka 14. Výsledné vlastnosti vzorků po expozici mikrovlnným zářením po deseti cyklech<sup>65</sup>

Číslo vzorku	Doba expozice [h]	Hmotnost vysušeného vzorku [kg]	Hmotnost nasáklého vzorku [kg]	Hmotnost vzorku po vystavení mikrovlnnému záření [kg]
1	2	4,583	5,258	4,844
2	1	4,535	5,198	5,042
3	2	4,631	5,287	4,660
5	4	4,540	5,225	4,544
6	4	4,555	5,204	4,559

Tabulka 15. Změřená rychlost šíření ultrazvukové vlny vzorky před a po expozici mikrovlnným zářením po deseti cyklu<sup>65</sup>

Číslo vzorku	Průměrná doba průchodu ultrazvuku cihlami (suchý stav; konstantní hmotnost) při $f = 54$ kHz [μs]	Průměrná doba průchodu ultrazvuku cihlami (po vystavení mikrovlnnému záření) při $f = 54$ kHz [μs]
1	160,59	157,00
2	154,41	151,80
3	116,34	114,70
5	165,17	169,70
6	151,05	143,40

Údaje o pevnosti v tlaku experimentálně zkoušených keramických cihel byly vypočteny odhadem na základě metody šíření ultrazvukové vlny, která je přímo ovlivněna homogenitou materiálu na přenosové cestě mezi vysílačem a přijímačem, zejména ve struktuře materiálu.

Bylo také zjištěno, že vlhkost materiálů ovlivňuje rychlost šíření ultrazvukového impulzu.<sup>73, 74</sup> Přítomnost vlhkosti materiálu, která se v porézni struktuře materiálů projevuje jako kapalná fáze vody a vyplňuje volný prostor pórů, zvyšuje rychlost šíření ultrazvuku v materiálu (rychlost ultrazvuku ve vodě je asi 3,5krát vyšší než ve vzduchu).<sup>73</sup> Proto je nutné během měření stanovit stav vlhkosti vzorků, aby byla zajištěna reprodukovatelnost výsledků měření.

Aby se vyloučil vliv vnitřní vlhkosti na výsledky, byly keramické cihly před provedením experimentu vysušeny na konstantní hmotnost.

U pálených hliněných cihel obecně platí, že přítomnost drobných trhlinek v cihle není vadou, pokud nemá nepříznivý vliv na deklarovanou pevnost v tlaku. Z hlediska hodnocení pevnosti v tlaku plných pálených cihel ultrazvukovou metodou je vliv neuspořádaných vad v mikrostruktuře vzorků cihel velmi výrazný, a proto jsou zjištěné údaje spíše odhadem. Technicky nebylo možné provést objektivně průkazné destruktivní zkoušky pevnosti v tlaku na zkoumaných cihlách, a proto byl použit výpočet odhadu pevnosti v tlaku – jak je patrné z výše uvedených výsledků. Tento odhad má svá omezení v podobě statistické chyby. Přesto lze tento postup odhadu pevnosti v tlaku doporučit pro další výzkum.<sup>65</sup>

## 9.6 Závěr

Na základě provedených experimentů a jejich následného vyhodnocení bylo možné potvrdit vliv sušení mikrovlnným zářením na pevnost v tlaku porézního keramického materiálu. Získané údaje dokazují, že mikrovlnné záření může být vhodnou metodou pro sušení plných pálených cihel, neboť neovlivňuje pevnost v tlaku cihel. Experiment byl proveden ve dvou sadách, kdy byly plné pálené cihly sušeny mikrovlnným zářením po různě dlouhou dobu, a ani po deseti cyklech expozice nedošlo ke změnám naměřených hodnot pevnosti. Pórovitost keramiky je obvykle 15-25 %, takže je pochopitelné, že zde byl k dispozici vnitřní prostor pórů pro odvod vodních par do okolního prostředí.

Výsledné pevnosti v tlaku zkoušených cihel byly vypočteny z rychlosti šíření ultrazvukových vln, ačkoli tímto postupem lze získat pouze odhad pevnosti, což vede k vyšší nejistotě měření. Ukázalo se, že rozdíly v rychlosti šíření ultrazvukové impulsní vlny mezi vysušenými vzorky a vzorky po vystavení mikrovlnnému záření jsou zanedbatelné.

---

<sup>73</sup> Schuller, M.P. *Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures*. Prog. Struct. Eng. Mat. **2003**, 5, 239–251.

<sup>74</sup> Lencis, U.; Udris, A.; Korjakins, A. *Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature*. Constr. Sci. **2013**, 14, 71–78.

Tento závěr byl potvrzen, a to i přes možnou nehomogenitu mikrovlnného záření, výrobní odchylky ve vlastnostech keramických cihel a/nebo vliv případné nerovnoměrné zbytkové vlhkosti z neúplného vysušení vzorků (výsledné odhady pevnosti v tlaku lze pozorovat v tabulce 17).

Tabulka 17. Přehled průměrné doby průchodu ultrazvukového impulsu.<sup>65</sup>

Číslo vzorku	Odhad pevnosti v tlaku vysušených vzorků [MPa]	Odhad pevnosti v tlaku vzorků po vystavení mikrovlnnému záření [MPa]
1	23,8	24,2
2	24,5	24,7
3	29,6	29,9
4	23,4	22,9
5	24,9	25,7
6	29,1	29,3
7	27,5	26,2
8	28,9	28,4
9	23,7	23,7
10	24,1	24,2
Hodnoty nejistot měření byly vyjádřeny na hladině spolehlivosti 95%	26,0 ± 5.0	25,9 ± 4.9

Nicméně tento experiment byl velmi omezený a má sloužit především jako podnět k dalšímu výzkumu, který by měl určit vliv EMW záření na různé typy cihel s různou pórovitostí, a získat tak průkaznější výsledky. Tato oblast je velmi perspektivní, protože hlavní výhodou mikrovlnného ohřevu je, že k ohřevu a odpařování vlhkosti obsažené v porézním systému keramické cihly dochází přímo v materiálu prostřednictvím absorpce mikrovlnného záření vodou. Ostatní metody sušení vedou potřebné teplo z povrchu sušeného materiálu a proces odstraňování vlhkosti je pomalejší a obvykle energeticky náročnější.<sup>65</sup>

## 10 Souhrnný závěr

Disertační práce se zaměřuje na analýzu vlivu mikrovlnného záření na stavební hmoty a je strukturována do dvou hlavních částí: rešeršní a experimentální.

Rešeršní část obsahuje šest hlavních kapitol, kde teoreticky rozpracovává mechanismus šíření vlhkosti a tepla, uvádí účinky mikrovlnného záření a popisuje způsoby sanace vlhkých stavebních materiálů.

V první experimentální části jsou zkoumány účinky mikrovlnného záření na čerstvé stavební směsi s využitím hydratujícího silikátového pojiva, konkrétně portlandského cementu CEM I 42,5 R. Zjištěno bylo, že urychlení procesu tuhnutí výrazně ovlivňuje pevnost v tlaku vzorků. Pozorovaný trend naznačuje, že prodlužované působení mikrovlnného záření snižuje výslednou pevnost po 7. i 28. dnech. Tato zjištění jsou v souladu s obecnými znalostmi. I přes nižší pevnosti v tlaku u vzorků vystavených mikrovlnnému záření, nebyly pozorovány výrazné rozdíly v dalších vlastnostech, jako je pevnost v tahu za ohybu, nasákavost a objemová hmotnost, ve srovnání s referenčními vzorky.

Druhá experimentální část se věnuje sanaci vlhkého zdiva pomocí mikrovlnného záření, zejména cihelných zdících prvků. Experimenty byly prováděny na pálených cihlách, ačkoli vzhledem k jejich vysoké pórovitosti nebyly pozorovány významné změny vlastností oproti referenčním vzorkům.

V závěrech práce je zdůrazněn potenciální přínos pro stavební praxi v oblasti urychlení tuhnutí betonových směsí a možnosti vysoušení cihelných zdív mikrovlnným zářením. Navrhuje se, že i přes nižší pevnosti betonu v důsledku působení mikrovln, by tato metoda mohla být využita v prefabrikaci betonu. Dále se naznačuje, že vysoušení cihelných vzorků pomocí mikrovlnného záření nevedlo k výrazným změnám v jejich fyzikálních a mechanických vlastnostech.

V dalším výzkumu by bylo vhodné rozšířit první experimentální oblast o další vzorky cihel a ve druhé experimentální oblasti zkoumat vliv mikrovlnného záření na různé druhy cementů nebo jiná pojiva. Redukce množství vody pomocí plastifikátorů by mohla být dalším směrem pro pokračování výzkumu. Takový rozšířený výzkum by mohl poskytnout hlubší porozumění a možná vyústit v novou disertační práci.

## 11 Zdroje

1. ŠUHAJDA, Karel. *Analysis of Interaction of Microwave Radiation with Moisture in Porous Building Materials*. Habilitation Thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2016.
2. Ochs, Fabian and H. M. Müller-Steinhagen. “*Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials*.” (2005).
3. *Jak vyvětrat plíseň*. Online. Naše Hobby. 2020. Dostupné z: <https://www.nasehobby.cz/jak-vyvetrat-plisen/>. [cit. 2023-10-17].
4. DOSEDĚLOVÁ, Adriana. *Víme, jak vyvětrat plíseň*. Online. Český kutil. 2019. Dostupné z: <https://ceskykutil.cz/clanek-22187-vime-jak-na-plisen-v-byte>. [cit. 2023-10-17].
5. RUBEŠOVÁ, Marie. *Dřevokazné houby – a jak na ně*. Online. Chatař chalupář. 2019. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/drevokazne-houby-%E2%80%93-a-jak-na-ne/>.
6. ČSN P 73 0610 (730610) *Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2000.
7. MRLÍK, F. - *Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí*, 1. vyd., Alfa, Bratislava 1985, ISBN #9955
8. BALÍK, M. *Vysušování zdiva I*. druhé rozšířené vydání, Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-856-3
9. Airaksinen, Sari. (2023). Role of Excipients in Moisture Sorption and Physical Stability of Solid Pharmaceutical Formulations.
10. LEBEDA, J. a kolektiv – *Sanace zavlhělého zdiva budov*, 1. vyd., Praha: SNTL, 1988. ISBN # 7246: 26.00
11. VLČEK, M.-MOUDRÝ, I.-NOVOTNÝ, M.-BENEŠ, P. *Poruchy a rekonstrukce v pozemních stavbách II.*, Brno: akademické nakladatelství Cerm, s.r.o. Brno, 1996.
12. KIEßL, K. *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation. Universität-Fachbereich Bauwesen, Essen 1983.

13. KOLOMAZNÍK, K., SEDLÁŘ, J., MACHÁČKOVÁ, A.: *Teorie technologických procesů III*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 1978, 1.vydání, skriptum VUT.
14. BRZOBOHATÝ, P.: *Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerních materiálů*. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, Zlín 2002, s. 15-18
15. KREMPASKÝ, Július. *Meranie Termofyzikálnych veličín*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969. ISBN 71-0,44-69.
16. Bc. David Průša *Identifikace tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“*. Brno, 2019. 86 stran. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc., Ph.D.
17. Tabulka hodnot součinitele tepelné vodivosti a objemové hmotnosti materiálů: *Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$* . Online. Přírodní stavba. Dostupné z: <http://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>.
18. ŘEHÁNEK, J. a kol.: *Tepelně technické a energetické vlastnosti budov*, Praha, Grada, 2002
19. HORÁK, Z.: *Praktická fyzika*. SNTL, Praha 1968
20. ZACH, HROUDOVÁ, *Možnosti stanovení součinitele tepelné vodivosti u keramických zdicích tvarovek*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014, GRANT journal ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4
21. ONDRÁŠ, J.: *Nestacionární metody měření tepelné vodivosti*. Diplomová práce, fakulta technologická, VUT Brno, Gottwaldov 1983
22. Maxwell, J.C. *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Philos. Trans. R. Soc. Lond. **1865**, 155, 459–512
23. The 70th birthday of Prof. Dr. August Žáček. Czech J. Phys. **1956**, 6, 204–205.
24. Kinn, T.P.; Marcum, J. *Possible Uses of Microwaves for Industrial Heating*. Prod. Eng. **1947**, 18, 137–140. Osepchuk, J.M. A History of Microwave Heating Applications. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **1984**, 32, 1200–1224.
25. Osepchuk, J.M. A History of Microwave Heating Applications. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **1984**, 32, 1200–1224.

26. Gartshore, A.; Kidd, M.; Joshi, L.T. *Applications of Microwave Energy in Medicine. Biosensors* **2021**, *11*, 96.
27. Guzik, P.; Kulawik, P.; Zając, M.; Migdał, W. *Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2022**, *62*, 7989–8008.
28. Hoehn, J.R. *Defense Primer: Military Use of the Electromagnetic Spectrum*. Library of Congress. Congressional Research Service 2022, Report IF11155, Version 15. Available online: <https://crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=IF11155>
29. Procházka, M.; Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Novotný, M. *Microwave radiation and its application on construction materials. Eng. Struct. Tech.* **2016**, *8*, 150–156.
30. Makul, N. *Effect of low-pressure microwave-accelerated curing on the drying shrinkage and water permeability of Portland cement pastes. Elsevier* **2020**, *13*, e00358.
31. Kvapilova, V. *Evaluation of microwave drying effects on historical brickwork and modern building materials. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, 867, 012026.
32. Kvapilova, V.; Suhajda, K. *Possibility of Using Microwave Radiation for Rehabilitation of Historical Masonry Constructions. Key Eng. Mat.* **2020**, 868, 119–126.
33. Tauhiduzzaman, M.; Hafez, I.; Bousfield, D.; Tajvidi, M. *Modeling Microwave Heating and Drying of Lignocellulosic Foams through Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Analysis. Processes* **2021**, *9*, 2001.
34. Sobotka, J.; Šuhajda, K.; Jiroušek, Z. *Mikrovlnná teorie ve stavební praxi. TZB-Info* 2017. Dostupné online: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/15568-mikrovlnna-teorie-ve-stavebni-praxi> [cit. 2023-10-17].
35. Novotný, M.; Šuhajda, K.; Sobotka, J.; Gintar, J.; Dová, E.S.; Mádl, M.; Jiroušek, Z. *Use of microwave radiation in building industry through application of wood element drying. Wood Res.* **2014**, *59*, 389–400
36. Průša, D.; Šťastník, S.; Šuhajda, K. *The possibilities of using microwave radiation to accelerate the solidification of mixtures consisting of a polymer matrix binder and a waste thermal insulation filler. AIP Conf. Proc.* **2022**, 2488, 020023.
37. Novotný, M.; Škramlík, J.; Šuhajda, K.; Tichomirov, V. *Sterilization of Biotic Pests by Microwave Radiation. Procedia Eng.* **2013**, *57*, 1094–1099.
38. Kääriäinen, H.; Rudolph, M.; Schaurich, D.; Tulla, K.; Wiggenhauser, H. *Moisture measurements in building materials with microwaves. NDT E Int.* **2001**, *34*, 389–394.

39. OLOYEDE, A., GROOMBRIDGE, P., – *The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood*. Journal of Materials Processing Technology 100, Elsevier 2000.
40. HÁJEK, M. – *Princip mikrovlnných metod a jejich využití*, s. 7-9, 2003, sborník z konference STOP-Mikrovlnné metody při ochraně památek.
41. SVAČINA, J., RŮŽIČKA, V., PUNČOCHÁŘ, J., – *Teorie obvodů v a technika velmi krátkých vln*, Brno 1980
42. Fuhrmann, J.M. *Micro-curing*. Concrete Construction 2002. Available online: [https://www.concreteconstruction.net/\\_view-object?id=00000154-1d54-db06-a1fe7f5ca5030000](https://www.concreteconstruction.net/_view-object?id=00000154-1d54-db06-a1fe7f5ca5030000) (accessed on 18 September 2023)
43. Sumra Yousuf, Payam Shafiq, Zainah Ibrahim, Huzaiifa Hashim, Mohammad Panjehpour *Crossover Effect in Cement-Based Materials: A Review*. Applied Sciences, 2019, mdpi.com.
44. Yang, K.-H.; Mun, J.-S.; Cho, M.-S. *Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High-Strength Concrete*. Adv. Mater. Sci. Eng. 2015, 2015, 12.
45. Kjellsen, K.; Detwiler, R. *Later-age strength prediction by a modified maturity model*. ACI Mater. J. 1993, 90, 220–227.
46. Newman, J.; Choo, B.S. *Advanced Concrete Technology 3: Processes*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2003.
47. Khan, M.S.; Abbas, H. *Performance of concrete subjected to elevated temperature*. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 2016, 20, 532–543.
48. Lothenbach, B.; Winnefeld, F.; Alder, C.; Wieland, E.; Lunk, P. *Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes*. Cem. Concr. Res. 2007, 37, 483–491.
49. Sajedi, F.; Razak, H.A. *Thermal activation of ordinary Portland cement–slag mortars*. Mater. Des. 2010, 31, 4522–4527.
50. Kim, J.-K.; Han, S.H.; Song, Y.C. *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results*. Cem. Concr. Res. 2002, 32, 1087–1094.

51. Namarak, C.; Satching, P.; Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. *Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash-calcium carbide residue*. Constr. Build. Mater. 2017, 147, 713–719.
52. Ezziane, K.; Bougara, A.; Kadri, A.; Khelafi, H.; Kadri, E. *Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under 476 various curing temperature*. Cem. Concr. Compos. 2007, 29, 587–593.
53. Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Novotný, M. *The effect of EMW radiation on the solidification of C-S-H gels: its influence on the mechanical and physical properties of solidified cement mixtures*. Gels **2023**, přijato k publikování
54. Alizadeh, R.; Beaudoin, J.J.; Raki, L. *Mechanical properties of calcium silicate hydrates*. Mater. Struct. 2011, 44, 13–28.
55. Pellenq, R.-M.; Lequeux, N.; Van Damme, H. *Engineering the bonding scheme in C–S–H: The iono-covalent framework*. Cem. 481 Concr. Res. 2008, 38, 159–174.
56. Nonat, A. *The structure and stoichiometry of C-S-H*. Cem. Concr. Res. 2004, 34, 1521–1528.
57. ČSN EN 197-1 ED.2 (722101) *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2012.
58. Rovnaník, P. a kol. *Stavební chemie*. Studijní opory. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2014.
59. Gazdič, D a kol. *Maltoviny*. Studijní opory. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2017.
60. ČSN EN 12390-7; *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 512 2020.
61. ČSN EN 12390-5; *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2020.
62. ČSN EN 12 390-3; *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2020.
63. ČSN EN 206+A2; *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 2021.

64. Průša, D.; Šuhajda, K.; Žajdlík, T.; Svobodová, K.; Šťastník, S.; Hobzova, K.; Venkrbec, V. *Effect of Microwave Radiation on the Compressive Strength of Solid Ceramic Brick*. *Buildings* **2023**, *13*, 1018. <https://doi.org/10.3390/buildings13041018>
65. ANOTKA, Miroslav; LINHART, Karel. *Řemesla našich předků*. 1.. vyd. Praha: Nakladatelství Svoboda, 1987. 208 s. 25-105-87. S. 141–145.
66. VOBODA, Luboš. *Stavební hmoty (volně dostupná elektronická kniha)*. [s.l.]: [s.n.], 2013. 950 s. [Dostupné online](#). ISBN 978-80-260-4972-2. [Archivováno](#) 16. 10. 2013 na [Wayback Machine](#)
67. *Cihla plan. Cihelna Zlín P20 290×140×65 mm*. Online. DEK.cz. 2023. Dostupné z: [https://www.dek.cz/produkty/detail/4400818054-zopy-cihla-plna-p20-290x140x65?gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-fJ6gIvJ3ej49-t8Ncd6LKMCAUoEZT4WY1uIa62H\\_O0\\_WN9-3XRGLgaAoiuEALw\\_wcB](https://www.dek.cz/produkty/detail/4400818054-zopy-cihla-plna-p20-290x140x65?gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-fJ6gIvJ3ej49-t8Ncd6LKMCAUoEZT4WY1uIa62H_O0_WN9-3XRGLgaAoiuEALw_wcB).
68. SN 72 2603; *Skúšanie Tehliarskych Výrobkov. Stanovenie Hmotnosti, Objemovej Hmotnosti a Nasiakavosti*. ÚNMZ: Praha, Czech Republic, 1979.
69. Khestl, F. *Ceramics. Testing of Building Materials and Products*. Technical University of Ostrava: Ostrava, Czech Republic, 2010. Available online: [https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly\\_zkouseni](https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly_zkouseni) [cit. 2023-10-17].
70. Brožovský, J. *Use of the ultrasonic pulse method for detecting the compressive strength of different types of bricks (Využití ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování pevnosti v tlaku různých druhů cihel)*. TZB-Info 2018. Available online: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/17190-vyuziti-ultrazvukove-impulsove-metody-pro-zjistovani-pevnosti-v-tlaku-ruznych-druhu-cihel>
71. Silva, F.A.N.; Delgado, J.M.P.Q.; Cavalcanti, R.S.; Azevedo, A.C.; Guimarães, A.S.; Lima, A.G.B. *Use of Nondestructive Testing of Ultrasound and Artificial Neural Networks to Estimate Compressive Strength of Concrete*. *Buildings* **2021**, *11*, 44.
72. Schuller, M.P. *Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures*. *Prog. Struct. Eng. Mat.* **2003**, *5*, 239–251.
73. Lencis, U.; Udris, A.; Korjakins, A. *Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature*. *Constr. Sci.* **2013**, *14*, 71–78.

## 12 Seznam publikací autora

### 12.1 2023

- SVOBODOVÁ, K.; PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K. MOŽNOSTI TVORBY ROZPOČTU INFORMAČNÍHO MODELU BUDOVY. JUNIORSTAV. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2023. s. 638-645. ISBN: 978-80-86433-80-6. ISSN: 1190-1535.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŽAJDLÍK, T.; SVOBODOVÁ, K.; ŠŤASTNÍK, S.; HOBZOVÁ, K.; VENKRBEC, V. Effect of Microwave Radiation on the Compressive Strength of Solid Ceramic Brick. *Buildings*, 2023, roč. 13, č. 4, s. 1-11. ISSN: 2075-5309.
- Průša, D.; Šťastník, S.; Šuhajda, K.; Svobodová, K.; Žajdlík, T.; Hobzová, K.; Novotný, M. The Effect of Microwave Radiation on the Solidification of C-S-H Gels: Its Influence on the Solidified Cement Mixtures. *Gels* **2023**, 9, 889. <https://doi.org/10.3390/gels9110889>
- Žajdlík, T.; Šuhajda, K.; Průša, D. Medium-Scale Fire Resistance Testing of Timber Structures with Composite Cement Fibre Materials. *Buildings* **2023**, 13, 527. <https://doi.org/10.3390/buildings13020527>

### 12.2 2022

- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; POLÁŠEK, J.; ŠUHAJDA, K. VLIV VEGETAČNÍ STŘECHY A KLASICKÉ PLOCHÉ STŘECHY NA TEPELNOU STABILITU OBJEKTU. JUNIORSTAV 2022, 24. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2022. s. 683-688. ISBN: 978-80-86433-76-9.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S. MOŽNOSTI VYUŽITÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ PRO URYCHLENÍ TUHNUTÍ SMĚSÍ TVOŘENÉ POJIVEM Z POLYMERNÍ MATRICE A PLNIVEM Z ODPADNÍCH TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ. JUNIORSTAV 2022 24. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2022. s. 557-562. ISBN: 978-80-86433-76-9.

## 12.3 2021

- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S. Využití odpadních tepelně-izolačních materiálů pro výplňové hmoty do keramických dutinových tvarovek. JUNIORSTAV 2021 23.ODBORNÁ KONFERENCE DOKTORSKÉHO STUDIA. Brno: 2021. s. 771-777. ISBN: 978-80-86433-75-2.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S.; ŽAJDLÍK, T. Numerické řešení vlivu vegetační vrstvy na teplotu v jednotlivých vrstvách vegetační ploché střechy. TZB-info, 2021, roč. 2021, č. 29.3.2021, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K.; ŠŤASTNÍK, S. Využití odpadních tepelně-izolačních materiálů pro výplňové hmoty do keramických dutinových tvarovek. TZB-info, 2021, roč. 2021, č. 13.4.2021, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; ŽAJDLÍK, T. The possibilities of filling ceramic hollow bricks with the use of waste thermal insulation materials. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2021. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K. The Possibilities of Using Microwave Radiation to Accelerate the Solidification of Mixtures Consisting of a Polymer Matrix Binder and a Waste Thermal Insulation Filler. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2021. ISBN: 978-0 7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- POLÁŠEK, J.; PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; ŽAJDLÍK, T. The Effect of a Green Roof on Thermal Stability of a Building when Compared to a Conventional Flat. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2021. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- Stanislav Stastnik, David Prusa; Design optimization of filled ceramic blocks. *AIP Conf. Proc.* 1 September 2023; 2849 (1): 370010. <https://doi.org/10.1063/5.0164656>

## 12.4 2020

- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; POLÁŠEK, J. RECYKLACE TEPELNĚ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ VE STAVEBNÍM ODVĚTVÍ. RECYCLING 2020 - Církulární ekonomika ve stavebnictví, recyklace a využívání druhotných stavebních materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství, 2020. s. 82-89. ISBN: 978-80-214-5894-9.
- PRŮŠA, D. Termoreflexní izolace ve stavebnictví. JUNIORSTAV 2020, 22. ODBORNÁ KONFERENCE DOKTORSKÉHO STUDIA. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2020. s. 895-899. ISBN: 978-80-86433-73-8.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; POLÁŠEK, J.; ŽAJDLÍK, T. Recycling of thermal insulation materials. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2020. s. 1-5. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- PRŮŠA, D.; ŠŤASTNÍK, S.; ŠUHAJDA, K.; POLÁŠEK, J. Reflectance expression of exterior plasters. In AIP Conference Proceedings. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.
- ŠŤASTNÍK, S.; PRŮŠA, D.; ŠUHAJDA, K. Optimization of geometric arrangement of filled ceramic blocks. In THERMOPHYSICS 2020: 25th International Meeting of Thermophysics and 20th Conference REFRA. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-0-7354-4041-8. ISSN: 0094-243X.

## 12.5 2019

- David Průša. Thermoreflexive insulation in building industry. In 4th International Meeting of Thermophysics, THERMOPHYSICS 2019 and 20th Conference on Modern Refractory Materials and Key Achievements in High-temperature Technologies, REFRA 2019. AIP conference proceedings. USA: AIP Conference Proceedings, 2019. s. 1-6. ISBN: 978-0-7354-1917-9. ISSN: 0094-243X.

### 13 Práce autora na projektech

Typ	Kód	Řešitel	Začátek, konec	Zařazení
spec. výzkum	FAST-J-21-7238	Ing. David Průša	1. 1. 2021 31. 12. 2021	řešitel
spec. výzkum	FAST-J-21-7373	Ing. Tomáš Žajdlík	1. 1. 2021 31. 12. 2021	spoluřešitel
TAČR ap.	TH04030425	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. Ph.D.	1. 1. 2020 31. 12. 2021	člen řeš. týmu
spec. výzkum	FAST-J-20-6467	Ing. Tomáš Žajdlík	1. 1. 2020 31. 12. 2020	spoluřešitel
spec. výzkum	FAST-J-20-6356	Ing. David Průša	1. 1. 2020 31. 12. 2020	řešitel
TAČR ap.	TH04030425	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. Ph.D.	1. 4. 2019 31. 12. 2019	spoluřešitel

### 14 Užité vzory

Užitný vzor s názvem Technologická linka pro materiálové využití drcených odpadních izolačních materiálů na bázi minerálních vláken a polystyrenu, který byl zapsán dne 9.8.2022 na Úřadu průmyslového vlastnictví jako užitný vzor č. 36257.

## 15 Seznam značek a symbolů

Značka	Definice	Jednotka
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$u_m$	Vlhkost hmotnostní	%
$\varphi$	Relativní vlhkost vzduchu	%
$t$	Teplota	$^{\circ}C$
$a_d$	Množství abradovaného plynu	$m^3$
$p$	tlak	$Pa$
$\mu_u$	Chemický potenciál vlhkosti	$J \cdot kg^{-1}$
$G$	Entalpie	$J$
$T$	Termodynamická teplota	$K$
$m$	Hmotnost	$kg$
$q_{m,t,1}$	Hustota hmotnostního toku kapalné vody v transmisi	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$k_m$	Součinitel vlhkostní vodivosti při vlhkostním spádu	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\rho$	Objemová hmotnost materiálu	$kg \cdot m^{-3}$
$du/dx$	Gradient vlhkosti	$m^{-1}$
$\mu$	Faktor difuzního odporu	-
$N$	Hodnota teplotní difuzní funkce	$s^{-1}$
$\delta$	Součinitel difuze vodní páry	$s$
$p_p$	Částečný tlak vodní páry	$Pa$
$p_p''$	Tlak nasycené vodní páry	$Pa$
$q$	Hustota tepelného toku	$W \cdot m^{-2}$
$Q$	Teplo	$J$
$D$	Rozměr	$m$
$S$	Plocha	$m^2$
$C$	Tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$a$	Teplotní vodivost	$m \cdot s^{-1}$
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$5,6697 \cdot 10^{-8} m \cdot s^{-2}$
$\varepsilon$	Emisivita	-
$V$	Objem	$m^3$
$b$	Tepelná jímavost	$(W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})^2$
$P$	Energie absorbovaná v jednotce objemu	$J$
$f$	Frekvence mikrovlnného pole	$Hz$
$\varepsilon'$	Permitivita	$F \cdot m^{-1}$
$\varepsilon''$	Dielektrický ztrátový faktor materiálu	$F \cdot m^{-1}$
$E$	Intenzita el. pole uvnitř materiálu	$V \cdot m^{-1}$
$h$	Planckova konstanta	$6,625 \times 10^{-34} J \cdot s$
$U$	Napětí	$V$
$P$	Příkon	$W$
$t$	Čas	$s$
$D$	Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$
$R_m$	Pevnost v tahu	$MPa$
$f_{ck}$	Pevnost v tlaku	$MPa$
$N$	Nasákavost	%
$ZP$	Zdánlivá pórovitost	%
$V$	Rychlost šíření ultrazvukové vlny	$Ms$