

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 405*

*ISSN 1213-418X*

**Miloslav Novotný**

**PROBLEMATIKA VYUŽITÍ  
MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ  
V POZEMNÍM STAVITELSTVÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

**doc. Ing. Miloslav Novotný, CSc.**

**PROBLEMATIKA VYUŽITÍ MIKROVLNNÉHO ZÁŘENÍ  
V POZEMNÍM STAVITELSTVÍ**

PROBLEMS OF UTILIZATION OF MICROWAVE RADIATION IN  
BUILDING CONSTRUCTIONS

Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení  
v oboru  
Pozemní stavby



BRNO 2011

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

pozemní stavby, elektromagnetické mikrovlnné záření, nedestruktivní měření vlhkosti, vlhkost, součinitel kapilární vodivosti, sanace vlhkosti, biologický škůdce, houby, plísně

## **KEY WORDS**

building constructions, electromagnetic microwave radiation, non-destructive measurement of humidity, moisture, capillary conductivity coefficient, biological pest, Fungi, Mould

© Miloslav Novotný, 2011

ISBN 978-80-214-4354-9

ISSN 1213-418X

## OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA .....	4
ÚVOD.....	7
1 VLHKOST STAVEB.....	7
2 ELEKTROMAGNETICKÉ MIKROVLNNÉ ZÁŘENÍ (EMWR) .....	8
3 VLHKOST VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH.....	11
3.1 Stanovení vlhkosti .....	11
3.2 Vliv vlhkosti na fyzikální vlastnosti stavebních materiálů .....	11
3.3 Využití EMWR pro stanovení navlhacích křivek .....	13
3.4 Stanovení hodnot součinitele kapilární vodivosti .....	16
4 SNIŽOVANÍ VLHKOSTI ZDIVA APLIKACÍ EMR .....	18
5 VYUŽITÍ EMWR PRO LIKVIDACI BIOTICKÝCH ŠKŮDCŮ .....	22
6 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU A PRO PRAXI .....	26
7 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI .....	27
8 POUŽITÁ LITERATURA.....	28
ABSTRACT .....	30

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA



**doc. Ing. Miloslav Novotný, CSc.**

Datum narození: 18. 7. 1955, Třebíč

Zaměstnání: Ústav pozemního stavitelství  
– vedoucí ústavu

Fakulta stavební VUT v Brně,  
Veveří 95, 602 00 Brno, ČR

Telefon: 541147400(409),

E-mail: novotny.m@fce.vutbr.cz,

Bydliště: Šemberova 16, 635 00 Brno, ČR

### Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

- Maturitní zkouška - Gymnasium Jihlava 1974,
- Ing. – Fakulta stavební VUT v Brně 1979,
- CSc. – Fakulta stavební VUT v Brně 1984,
- Doc. – Fakulta stavební VUT v Brně 1999,
- Zaměstnání: asistent (1980), interní aspirant (1980 - 1983), odborný asistent (1983 - 1999), docent (1999 - dosud), samostatný projektant PVÚ VUT v Brně (1986 - 1989).

### Funkce:

- 1987 - 1997 tajemník Ústavu pozemního stavitelství;
- 1997 - 2000 zástupce vedoucího Ústavu pozemního stavitelství,
- 2000 - 2003, 2010 – současnost - proděkan Fakulty stavební,
- 2006 – současnost - vedoucí Ústavu pozemního stavitelství,
- 2000 - 2003, 2006 - 2010, 2010 - současnost, člen VR FAST VUT v Brně,
- 2000 - 2003 člen VR FA VUT v Brně,
- 2010 - člen VR ÚSI VUT v Brně.

### Specializace:

Teorie konstrukcí pozemních staveb, poruchy a rekonstrukce staveb, vlhkost staveb se zaměřením na využití mikrovlnného záření, využití dřeva a materiálů na bázi dřeva v konstrukcích pozemních staveb.

### Pedagogická činnost:

- Přednášky: Pozemní stavitelství (pro obor V), Pozemní stavitelství a Konstrukce pozemních staveb (pro obor S), Konstrukce pozemních staveb (pro obor E), Projektování rekonstrukcí, Zastřešení budov (denní i kombinované studium), Poruchy a rekonstrukce, Pozemní stavitelství a stavební fyzika (Mgr. program ÚSI VUT);
- Diplomové práce: předseda komise pro SZZ - vedení diplomových prací celkem 78 (cca 30 hodnoceno „výborně“, několik ocenění děkana – např. Dita Baničová, Vladan Henek, Jakub Moc, Tomáš Černický); ocenění medailí FAST a cenou WTA CZ – Jan Sasín

- Doktorské studium: člen komise pro SDZ - školitel studentů doktorského studia – dosud 9 absolventů s titulem Ph.D., (Ing. Jitka Balíková, Ph.D., Ing. M. Manychová, Ph.D., Ing. Dita Baničová, Ph.D., cena rektora za doktorské studium, Ing. Karel Šuhajda, Ph.D., Ing. Pavel Zejda, Ph.D., Ing. Tomáš Černický, Ph.D., Ing. Oldřich Tomíček, Ph.D., Ing. Jana Pexová, Ph.D a Ing. Tomáš Alexa, Ph.D.);
- Odborný garant předmětů Bc., Mgr. a Ph.D. studia: 1H0 Projekt I, 1H1 Projekt, 9H4 Organizace projektových prací, BH 09 Poruchy a rekonstrukce, HD7 Zastřešení budov, DH 81 Teorie konstrukcí pozemních staveb, DH51 Vybrané stati z teorie konstrukcí pozemních staveb, DH01-07 Doktorský seminář, AH01 Pozemní stavitelství I, AH02 Pozemní stavitelství II, RAPS Pozemní stavby a stavební fyzika.

### **Odborná praxe:**

- 1979 - 1980 VÚ Nové Město nad Metují – stavební referent; 1986-1989 samostatný projektant PVÚ VUT v Brně;
- 1991 – OSVČ – projektová činnost v investiční výstavbě na základě Osvědčení o zvláštní způsobilosti k projektové činnosti v investiční výstavbě;
- 1994 - autorizovaný inženýr pro obor Pozemní stavby;
- 1997- soudní znalec v oboru stavebnictví, odvětví stavby obytné a stavby průmyslové);
- 2003 – 2005 - odborný garant skupiny technické podpory pro firmu Orsil-Isover;
- 2006 - 2007; vedoucí týmu technických poradců - akce Rehabilitace Brownfields Ponava pro společnost Pricewaterhouse Coopers 2007 - 2009.

### **Profesní organizace:**

- Dozorčí rada ČKAIT (1999 - 2004, 2010 – současnost - místopředseda),
- Dozorčí komise ČKAIT Brno – předseda (2004 - současnost),
- WTA CZ - vědecký tajemník (2006 - současnost).

### **Výzkum a vývoj:**

- 1986-1990 Státní výzkumný úkol II-8-2 Nedestruktivní metody pro detekci dřevní hmoty v konstrukci – člen řešitelského kolektivu;
- 1993 Projekt č. 35/93-B Nedestruktivní stanovení vlhkosti stavebních látek pomocí mikrovlnného elektromagnetického záření – spoluřešitel;
- 1993 Projekt č. 83/93-F Znojemská rotunda – spoluředitel;
- 1996 - 2000 Projekt MPO-Regenerace panelových domů - PZ-S/10/98 - vedoucí pracovní skupiny PST-NPS;
- 1999-2004 VVZ MSM 261100008 Výzkum a vývoj nových materiálů z odpadních surovin a zajištění jejich vyšší trvanlivosti ve stavebních konstrukcích. HT II Vývoj a použitelnost stavebních systémů – DT 8 Výzkum a vývoj konstrukčních systémů v pozemních stavbách – člen řešitelského týmu;
- 2003 FRVŠ A 857/2003 – Fakultní počítačová a grafická laboratoř – spoluřešitel;
- 2001-2003 GAČR 103/01/0964 Analýza působení mikrovlnného záření na stavební materiály – řešitel;
- 2005-2011 MSM 00216 305 11 Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí – DT 11 Výzkum a vývoj konstrukčních systémů v pozemních stavbách – člen užšího řešitelského týmu;

- 2008 Projekt FRVŠ A 2106/2008 - Laboratoř počítačové grafiky a vizualizací – řešitel;
- 2010-2012 GAČR 104/10/1390 Analýza vlivu mikrovlnného předsušení při aplikaci chemických injektáží vlhkého zdiva – řešitel;
- Patent v EU: 2007 - Zařízení pro sledování šíření vlhkosti v pórovitých hmotách – spoluautor;
- Národní patent: 2010 - Způsob sledování šíření vlhkosti v pórovitých hmotách a zařízení k jeho provádění – spoluautor;
- Užitný vzor v BRD: 2007 - Zařízení pro sledování šíření vlhkosti v pórovitých hmotách – spoluautor;
- Užité vzory: 1999 - Systém vegetační střechy Orsil-Agro, 2006-Dočasná ochranná zábradlí, 2007 - Zařízení pro sledování šíření vlhkosti v pórovitých hmotách – spoluautor;
- Ověřená technologie: 2011 - Spojování asfaltových pásů pomocí horkého vzduchu - spoluautor.
- Experimentální zařízení: 2006 - Zařízení pro sledování šíření vlhkosti v pórovitých hmotách – spoluautor;
- ORCET - Systém suchých plovoucích podlah – Velká cena za novinku na Mezinárodním stavebním veletrhu For Arch 1996 a For Tech 1996 – spoluautor; Montovaný dřevěný RD AS-D-108 – dům roku 1996 – spoluautor;

#### **Publikace:**

- |                                    |         |
|------------------------------------|---------|
| ● Monografie                       | 3,      |
| ● Časopisy zahraniční              | 14,     |
| ● Časopisy v ČR                    | 27,     |
| ● Sborníky zahraničních konferencí | 58,     |
| ● Sborníky národních konferencí    | 51,     |
| ● Skripta                          | 4,      |
| ● Znalecké posudky                 | 156,    |
| ● Odborné posudky                  | 50,     |
| ● Projekty                         | cca 30. |

## ÚVOD

Dlouholetou odbornou tematikou mé činnosti v oblasti výzkumu a vývoje je problematika sanace nadměrné vlhkosti staveb s využitím elektromagnetického mikrovlnného záření (EMWR – Elektromagnetic Microwave Radiation). V této oblasti jsem na Ústavu pozemního stavitelství již vedl jako školitel 5 absolventů Ph.D., kteří v této oblasti společně se mnou pokračují v rozvoji této problematiky.

Aplikace EMWR v pozemním stavitelství se začala rozvíjet až v posledních 20 letech, zejména v oblasti rychlého snižování vlhkosti ve stavebních konstrukcích a materiálech např. po povodních, nebo po provedení sanačního zásahu odstraňujícího vlhkost částečně, a po sanaci biologického napadení zdiva i dřevěných prvků.

V oblasti aplikace EMWR v pozemním stavitelství se na Ústavu pozemního stavitelství dlouhodobě zabýváme těmito základními oblastmi:

- metoda využití EMWR pro detekci obsahu vlhkosti (obsahu volné vody) v pórovitých stavebních látkách – využívá se Gunnových diod o výkonu cca 100-200 mW a o frekvenci okolo 10 GHz;
- metoda snižování nadměrné vlhkosti (obsahu volné vody) ve stavebních prvcích a konstrukcích s využitím EMWR – využívá se zařízení firmy Plazmatronika o výkonu 700 a 1200 W a o frekvenci 2,45 GHz;
- metoda likvidace biologického napadení (desinfekce a desinsekce) ve stavebních prvcích a konstrukcích s využitím EMWR – využívá se zařízení firmy Plazmatronika o výkonu 700 a 1200 W a o frekvenci 2,45 GHz.

## 1 VLHKOST STAVEB

Velkým problémem stavebnictví je nadměrná vlhkost stavebních prvků a konstrukcí, která vyžaduje odstraňování zvýšené vlhkosti, ať již v souvislosti se vznikem poruch a vad způsobujících vnikání klimatické nebo podpovrchové vody do objektu, nebo v souvislosti s kondenzací vodních par na vnitřním povrchu nebo přímo ve skladbě zejména obvodových konstrukcí.

Vlhkost stavby je dána vlhkostí jednotlivých stavebních prvků a konstrukcí tvořených různými stavebními materiály, které jsou vyrobeny ze stavebních látek. Vlhkost stavební látky je dána množstvím volné vody v pórové struktuře a vyjadřuje se objemovým či hmotnostním poměrem volné vody k pevné fázi, nebo procentem nasycení vodou.

Vlhkost má podstatný vliv na základní vlastnosti stavebních materiálů, ze kterých jsou vyrobeny stavební prvky a konstrukce, zejména na jejich mechanické a tepelně technické parametry, změny objemu, změny struktury, vyluhování některých složek, apod.. Vlhkost má rovněž negativní vliv na závazné hygienické parametry vnitřního mikroklimatu především v souvislosti s vytvářením vhodného prostředí pro možnost růstu hub a plísní. V mnoha případech se stává, že vlhký objekt není podstatně ohrožen z hlediska mechanické odolnosti a stability, ale vlhké vnitřní prostředí, např. s toxickými plísněmi, nedovoluje využití objektu z hlediska splnění základních hygienických požadavků.

Ve stavební praxi se ve většině stavebních materiálů stavební látky nevyskytují v suchém stavu, ale i při správném návrhu se v nich vyskytuje jistý objem volné vody tzv. rovnovážná vlhkost, která závisí na druhu stavební látky a na okrajových vnějších podmínkách (teplotě a relativní vlhkosti vzduchu), ve kterých je umístěna. Vlhkostní problémy staveb jsou spojeny



s pohybem vody ve formě kapalné nebo plynné. Vlhkost se do stavebních materiálů dostává zpravidla v celém průběhu výroby, zpracování, následného zabudování do stavby a užívání.

Poruchy staveb způsobené nadměrnou vlhkostí, např. cihelného zdiva, znamenají spolu s poklesem mechanických (pevností v tlaku a tahu, modulů pružnosti) a fyzikálních (zejména součinitele tepelné vodivosti) parametrů výrazné zhoršení funkčnosti uvedených objektů a vytváří podmínky pro vznik nemocí a alergií. Současně negativně ovlivňují životní prostředí, dochází k postupné degradaci stavebních materiálů, uvolňování do okolí, k podstatnému zvýšení nároků na spotřebu energie vlivem zhoršení tepelně technických vlastností.

Sanaci nadměrné vlhkosti staveb je možno zařadit mezi velmi náročné disciplíny ve stavebnictví mnohdy s nejistým výsledkem. V každém městě či obci je řada objektů s prvky a konstrukcemi zatíženými vlhkostí, počínaje budovami pro bydlení, přes stavby občanské vybavenosti, stavby průmyslové a zemědělské až po historické zpravidla památkově chráněné objekty. Je tedy možno objektivně konstatovat, že ochrana staveb před vodou a vlhkostí je bezesporu jednou z nejdůležitějších opatření k zajištění dlouhodobé životnosti stavby a její dobré funkčnosti a spolehlivosti.

Jako příklad je možno uvést příklad z oblasti nadměrné vlhkosti klasického zdiva z plných pálených cihel. Jestliže dojde k plnému nasycení pórů cihelného střepu, což je přibližně při hmotnostní vlhkosti blízké se až ke 20 %, pak při objemové hmotnosti zdiva 1800 kg.m<sup>-3</sup> může činit množství vody v 1 m<sup>3</sup> zdiva cca 360 l, tzn., že např. zdivo tl. 450 mm obsahuje cca 160 l na 1 m<sup>2</sup>. Pokud chceme alespoň orientačně odhadnout, za jak dlouho dojde k samovolnému vysušení zdiva do rovnovážného stavu s hmotnostní vlhkostí cca 3 %, lze užít Cadierguesova vztahu [9] [14]:

$$T = k \cdot b^2 \quad [\text{dny}] \quad (1.1)$$

kde T ..... doba nutná k samovolnému vyschnutí stavební látky [dny],  
k ..... koeficient odpařování (pro zdivo z CPP 0,28) [-],  
b ..... tloušťka zdiva [mm].

Samovolné vysušení zdiva tloušťky 450 mm by tedy za ideálních přirozených podmínek probíhalo cca 1,5 roku. Zde je však nezbytné vzít v úvahu vlivy okolního prostředí – střídání ročních období, možnosti odvádění odpařené vlhkosti z vnitřního prostoru, vliv omítek, obkladů, apod., které vysušování ovlivňují- Zkušeností ze stavební praxe se doba samovolného vysychání při reálných podmínkách pohybuje okolo 3 let.

## 2 ELEKTROMAGNETICKÉ MIKROVLNNÉ ZÁŘENÍ (EMWR)

Pod pojmem EMWR se rozumí elektromagnetické vlny s frekvencí v rozsahu 300 MHz až 30 GHz. Ve spektru elektromagnetických vln leží mikrovlny mezi radiovými vlnami s nižší frekvencí a infračerveným zářením s frekvencí vyšší.

EMWR se od zdroje šíří ve formě vln, což znamená, že parametry jak elektrické, tak magnetické složky vlnění se periodicky v čase mění. Předpokládá se sinusový průběh vlnění s určitou délkou vlny a frekvencí, která určuje četnost střídání vln.

$$\lambda = \frac{c_\lambda}{f} \quad [\text{m}], \quad (2.1)$$

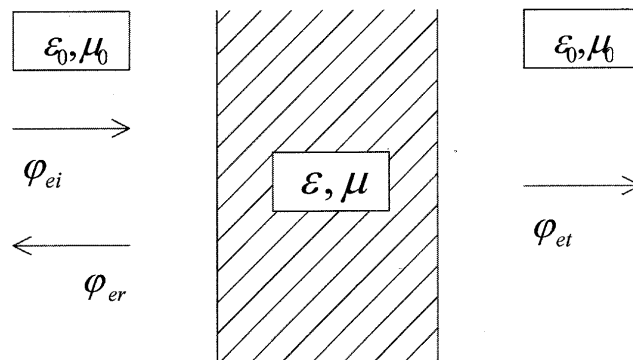
kde  $\lambda$  ..... délka vlny [m],  
 $c_\lambda$  ..... rychlost šíření vlny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $f$  ..... frekvence mikrovlnného záření [Hz] (2450 MHz). [8] [11] [18]

Ve volném prostoru se EMWR šíří od svého zdroje rychlostí světla, což představuje pro tzv. „průmyslovou frekvenci“ 2450 MHz (nejčastěji využívanou ve stavební i technické praxi) při šíření ve volném prostoru délku vlny 122 mm. Frekvence 2450 MHz je velmi vhodná pro ohřev vody a rovněž nekoliduje s telekomunikačními frekvencemi. Po vstupu do jiného materiálu se délky vlny, a tedy i rychlost šíření změní, a to v závislosti na dielektrických vlastnostech materiálu. Pro detekci vlhkosti (obsahu volné vody) se ve stavební praxi využívá i frekvence okolo 10 GHz. [8] [12]

EMWR má mnoho vlastností podobných viditelnému záření (světlu). Šíří se přímočaře, může se lámat, odrážet a v určitých případech i koncentrovat do jednoho bodu. K lomu a odrazu EMWR dochází na rozhraní dvou látek rozdílných dielektrických vlastností, tedy na i přechodu ze vzduchu do ohřívané látky. O podílu odraženého a prostupujícího EMWR rozhoduje především rozdíl dielektrických vlastností obou prostředí a úhel dopadu na plochu rozhraní. Pro lom EMWR platí optické zákony.

Zdrojem EMWR pro využití ve stavební praxi mohou být Gunnovy diody, tranzistory (výkon zpravidla v mW – využívají se k detekci vlhkosti) nebo vysokonapěťové elektronky magnetrony nebo klystrony (výkon cca od 500 do 3000 W).

Při dopadu EMWR na rozhraní dvou elektromagneticky odlišných látek (tj. s rozdílnou permitivitou  $\epsilon$ , resp. permeabilitou  $\mu$ ) dochází jednak k odrazu části energie dopadajícího záření, jednak k jeho pronikání do prostředí. Část pronikajícího záření je pohlcena prozařovaným prostředím a část vrstvou odlišného prostředí prochází (Obr. 1).



**Obr. 1)** Průchod EMWR vrstvou dielektrika

Podíl energie odraženého, pohlceného a prošlého EMWR závisí na dielektrických vlastnostech prostředí, frekvenci EMWR a úhlu dopadu na rozhraní dvou vrstev. Při využití pro detekci vlhkosti je útlum EMWR charakterizován součinitelem útlumu EMWR vyjádřeným jako poměr hustoty dopadajícího a prošlého zářivého toku [1] [2] [8].

$$a = \varphi_{ei} / \varphi_{et} \quad [-] \quad (2.2)$$

kde  $\varphi_{ei}$  ..... hustota dopadajícího zářivého toku [ - ],  
 $\varphi_{et}$  ..... hustota prošlého zářivého toku [ - ].

Vztah (2.2) se často upravuje do logaritmického tvaru a útlum mikrovlnného záření  $L$ , se pak vyjadřuje v decibelech (starší přístroje pro detekci vlhkosti měly odečítání útlumu v dB):

$$L = 10 \text{ dB} \cdot \log \varphi_{ei} / \varphi_{et} \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

Útlum EMWR je závislý na obsahu volné vody (vlhkosti) v pórové struktuře látek, a proto je možno na základě stanovit závislost útlumu EMWR na hmotnostní vlhkosti  $u_m$  jednotlivých stavebních materiálů [2] [8] [18].

Pro rychlý ohřev a i likvidaci biotických činitelů se využívá působení EMWR přímo na molekuly vody, to znamená i na organismy vodu obsahující. Mechanismus přeměny energie EMWR na teplo je dán následujícím vztahem [2] [8] [18] [28]:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon'' \cdot E^2 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (2.4)$$

kde  $P$  ..... energie absorbovaná v jednotce objemu [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $f$  ..... frekvence mikrovlnného pole [2450 MHz],  
 $\varepsilon'$  ..... permitivita [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ],  
 $\varepsilon''$  ..... dielektrický ztrátový faktor materiálu,  
 $E$  ..... intenzita el. pole uvnitř materiálu [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

Charakteristické vlastnosti EMWR (vlastnosti, které jsou odlišné od klasického ohřevu):

- **Objemový ohřev** - k ohřevu dochází v celém objemu, tj. zevnitř a nikoliv přestupem tepla od povrchu dovnitř, jak je tomu u klasického ohřevu. To může přispívat k rovnoměrnosti ohřevu, avšak v závislosti na tvaru, velikosti konstrukčního prvku a složení materiálu. Záleží na teplotním profilu, který je opačný než u ohřevu klasického, nejvyšší teplota je uvnitř materiálu a klesá směrem k povrchu.
- **Selektivní ohřev** - k ohřevu u vícesložkového materiálu dochází jen u složky, která absorbuje EMWR (tj. obsahuje volnou vodu). Neabsorbující složka se neohřívá, nebo jen vedením od ohřáté složky (např. keramický střepek, pórobeton, dřevo). Při sušení se selektivně ohřívá jen vlhká látka a sušení je mnohem rovnoměrnější a úspornější než při klasickém způsobu. Může však dojít i k nerovnoměrnému ohřevu, to je třeba pak řešit např. snížením výkonu nebo formou tzv. pulzního ohřevu.
- **Lokální přehřátí** - k nerovnoměrnému ohřevu nemusí dojít jen v důsledku selektivního ohřevu, ale nejčastěji k němu dochází v důsledku nehomogenity pole EMWR. Pole EMWR rozptýlené v prostoru není nikdy zcela homogenní, tj. existují místa s vyšší a nižší intenzitou (tzv. „hot spots“), která mohou způsobit výrazné místní přehřátí materiálů. V kuchyňských mikrovlnných troubách se tento jev potlačuje rotačním talířem, u průmyslových zařízení běžícím pásem.

- **Teplotní úlet** - dochází k němu jen ve výjimečných případech, kdy intenzita absorpce EMWR prudce stoupá s teplotou (např. u práškových kovů). U vody tento případ nenastává, neboť absorpce EMWR s teplotou klesá, může však dojít k přehřátí vody nad 100 °C.

Výše uvedené možnosti využití EMWR se tedy jeví jako velmi vhodné pro stavební praxi, protože se jedná o rychlou, nedestruktivní a energeticky úspornou metodu detekce vlhkosti (množství volné vody v pórové struktuře) ve stavebních materiálech, rychlého snižování vlhkosti ze stavebních konstrukcí, např. po povodních, nebo po provedení sanačního zásahu včetně sanace biologického napadení zdiva i dřevěných prvků.

## 3 VLHKOST VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH

### 3.1 Stanovení vlhkosti

Vlhkost zdiva je určována několika metodami, které lze dle různých kritérií rozdělit. Podle způsobu stanovení vlhkosti zdiva je můžeme rozdělit na [8] [15] [16] [17]:

- přímé metody
  - gravimetrická,
  - karbidová.
- nepřímé metody
  - odporové,
  - kapacitní,
  - termovizní,
  - zpomalení rychlých vektorů,
  - EMWR,
  - a další.

Podle způsobu měření a případného odběru vzorků ještě můžeme metody rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. Jednou z novějších nedestruktivních metod je právě metoda s využitím EMWR [15].

EMWR byla zvolena pro detekci obsahu volné vody ve stavebních materiálech proto, že je nedestruktivní a umožňuje rychlé získávání potřebných informací o transportu vlhkosti bez manipulace se vzorkem, a to v různých časových intervalech od počátku navlhání.

Metoda detekce vlhkosti pórovitých stavebních látek je založena na stanovení změn útlumu EMWR v závislosti na množství volné vody v pórové struktuře při průchodu vlhkým stavebním materiálem

Důvodem, proč u stavebních materiálů zjišťovat vlhkost metodou s využitím EMWR je zejména skutečnost, že ze získaných výsledků je možné stanovit relativně jednoduše parametry, které mají zásadní vliv na tepelně technické charakteristiky stavebního materiálu, zejména na součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ .

### 3.2 Vliv vlhkosti na fyzikální vlastnosti stavebních materiálů

Současné výpočtové metody umožňují navrhnout obvodové konstrukce s dostatečnou bezpečností, ale zpětně je jejich použití obtížné (např. pro kontrolu naměřených vlastností porovnáváním naměřených hodnot s výpočtovými). Korekční koeficienty k hodnotě součinitele tepelné vodivosti jsou často univerzální a nepřesné. Největší chyby vznikají při tepelně technických návrzích vycházejících se součinitele tepelné vodivosti látky, kde se za  $\lambda$  dosadí

hodnoty, které odpovídají vlastnostem materiálu v suchém stavu. Některé rozdíly mezi hodnotami  $\lambda$  v suchém stavu a skutečnými hodnotami při respektování vlivu vlhkosti jsou tak velké, že mohou vést až k nepoužitelnosti některých kritérií [8] [12] [19]. Vliv vlhkosti na součinitele tepelné vodivosti se mění v závislosti na konkrétní teplotě a vlhkosti materiálu.

Šíření vlhkosti je obecně popsáno parciální diferenciální rovnicí (3.1) [3] [4] [14]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa_m(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

Při posuzování hustoty hmotnostního toku kapalné vody s vlhkostním gradientem platí:

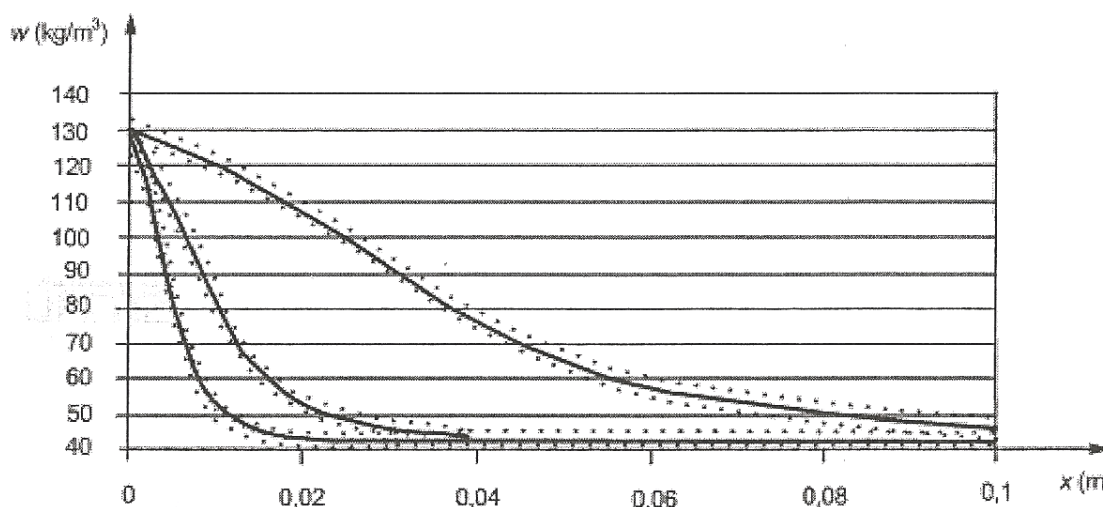
$$q_{t,1} = -\kappa_m \cdot \rho_s \cdot \frac{du_m}{dx} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.2)$$

kde  $u_m$  hmotnostní vlhkost materiálu [%],  
 $\rho_s$  objemová hmotnost suchého materiálu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $\kappa_m$  součinitel kapilární vodivosti při gradientu vlhkosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Vztah (3.2) vyjadřuje přímou úměrnost mezi hustotou hmotnostního toku kapalné vody při gradientu vlhkosti, objemovou hmotností materiálu v suchém stavu a vlhkostním spádem (záporně uvažovaným gradientem vlhkosti), přičemž součinitel kapilární vodivosti při gradientu vlhkosti  $\kappa_m$  je vlastně součinitelem úměrnosti. Může být definován vztahem [3] [4] [16]:

$$\kappa_m = - \frac{q_{t,1}}{\rho_s \cdot \frac{du_m}{dx}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.3)$$

Zjištění hodnoty  $\kappa_m$  pro konkrétní stavební materiál však bývá často problematické, a proto se vesměs empiricky přebírá z tabulek, kde bývá uveden pouze svou jedinou hodnotou, a to v suchém stavu materiálu.



**Graf. 1)** Rozložení vlhkosti v 7, 30 a 365 dnech [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] [19] [23]

Podkladem pro výpočet stanovení součinitele kapilární vodivosti  $\kappa_m$  stejně jako pro přenosové koeficienty  $D_w$  (EN 15148) případně  $K$  (EN 15026) je znalost křivek navlhání, viz Graf 1. Obecné navlhací křivky  $u(x)$  v časových intervalech  $\tau_x$  v průběhu navlhání měřeného vzorku materiálu uvedené v informativní části EN ISO 15026 (viz graf 1).

Metodika jejich zjišťování není stanovena, v normě se doporučuje uplatnění metody nukleární magnetické rezonance (NMR). EN ISO 15026 (2007) „Assesment of moisture transfer by numerical simulation“, vychází ze zjišťování rozdílu parciálních tlaků a EN ISO 15148 (2004) a v závěru uvádí pouze informativní zmínku, vycházející z doporučení využití metody NMR, bez bližšího stanovení způsobu zjišťování vstupních hodnot pro výpočet součinitele kapilární vodivosti. Normou uváděný výpočet vychází z rozdílu parciálních tlaků, uvádí vlhkostní parametr  $K [s \cdot m^{-1}]$  jako kapalná vodivost ve vztahu pro výpočet hustoty vodní páry.

EN ISO 12571 se zabývá pouze numerickou simulací na základě rozdílu parciálních tlaků bez uvedení konkrétní metodiky měření vstupních údajů na konkrétním vzorku materiálu jak pro výpočet součinitele kapilární vodivosti, tak i pro jeho praktické uplatnění ve stavební praxi.

Normová legislativa předepisuje návrh konstrukce tak, aby se dosáhlo příznivého vlhkostního stavu s doporučením omezit množství pohlcené srážkové vody, pronikání vody do konstrukce a kondenzaci vodní páry.

### 3.3 Využití EMWR pro stanovení navlhacích křivek

Zjišťování navlhacích křivek se ve stavební praxi běžně provádí gravimetrickou metodou. Je to metoda destruktivní a její nevýhodou je možnost vyjádření jedné křivky pro každý jeden vzorek, a také nepřesností výsledků měření, způsobených vlivem manipulace se vzorkem s ohledem na lámání vzorku materiálu (cca po 20 mm) a malou četnost zjišťovaných hodnot.

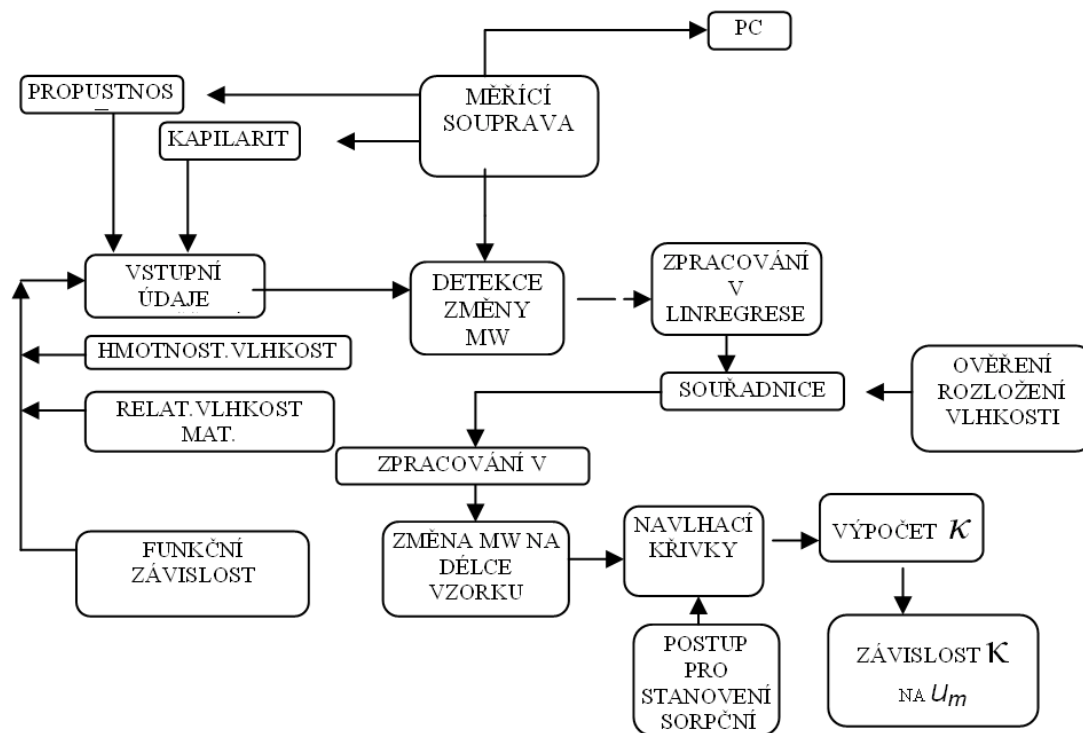
Metoda s využitím EMWR ve srovnání s gravimetrickou metodou umožňuje získání podstatně vyšší četnosti přesnějších výstupů – navlhacích křivek (cca v řezech po méně jak 3 mm) a současně vylučuje ztráty manipulací se vzorkem. Kromě toho jsou výstupy měření kontinuálně snímány a vyhodnocovány elektronicky bez vlivu chyby lidským faktorem.

Metoda s využitím EMWR je, ve srovnání na příklad s metodou NMR, kterou doporučuje v informativní části ČSN EN ISO 15148, z hlediska využití ve stavební praxi významně dostupnější. NMR nachází uplatnění především v medicíně, jde o velmi nákladné zařízení a výstupy měření jsou vhodné spíše pro podrobnou chemickou analýzu, což není pro tento účel nezbytné.

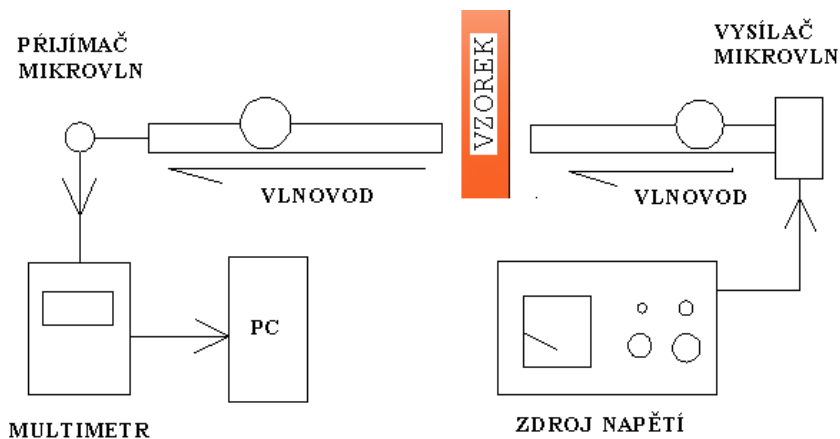
Na obr. 2 je vývojový diagram popisující metodiku měření, který byl podkladem pro sestavení měřící aparatury pro využití EMWR. Měřící aparatura umožňuje získat navlhací křivky postupného navlhání stavebního materiálu a následně stanovit parametr, tj. součinitel kapilární vodivosti, jako funkční závislost na hmotnostní vlhkosti, což výpočty tepelně technických posudků jednoznačně zpřesní.

Experimentálně sestavená měřící aparatura pro rychlé měření vlhkosti je schematicky zobrazená na obr. 3 a je chráněna jako užitečný vzor a patent v ČR i v zahraničí.

Při měření je sledován útlum EMWR při průchodu vzorkem stavebního materiálu definované tloušťky, který závisí na množství vlhkosti obsažené v pórovité látce. Aparatura je uspořádána tak, že měřený vzorek materiálu ve tvaru kvádra je umístěn mezi vysílací a přijímací vlnovod, jeho nejmenší základna je v kontaktu s vodní hladinou. Vzorkem vzlíná voda a kolmo ke směru vzlínání skrze nejtenčí rozměr zkušebního kvádra prostupuje paprsek EMWR. Výška paprsku od vodní hladiny je měnitelná. Pro co nejefektivnější sledování transportu vzlínající vlhkosti v pórovitém materiálu byly nastaveny jednoznačně definované počáteční a okrajové podmínky.

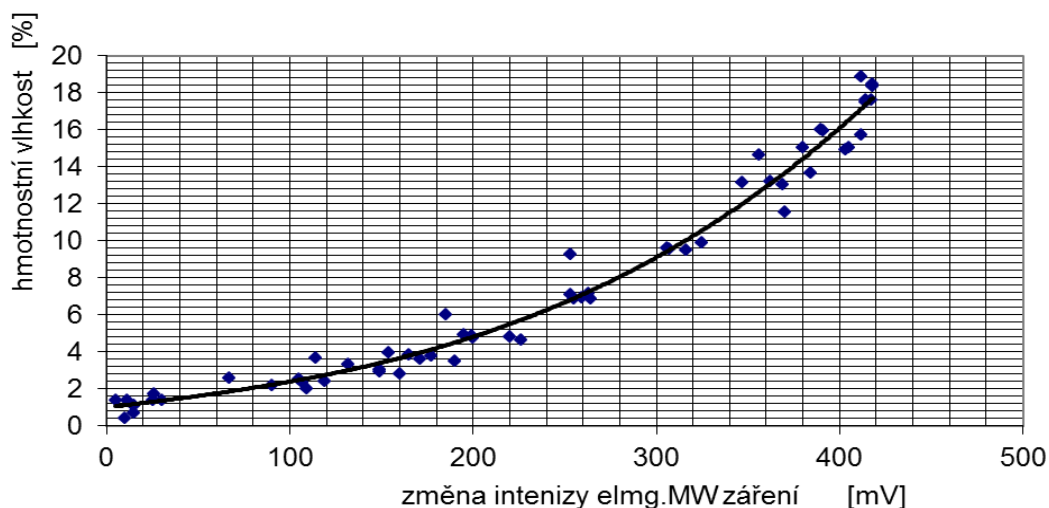


**Obr. 2)** Metodika měření na experimentálně sestavené měřící aparatuře [25] [23]



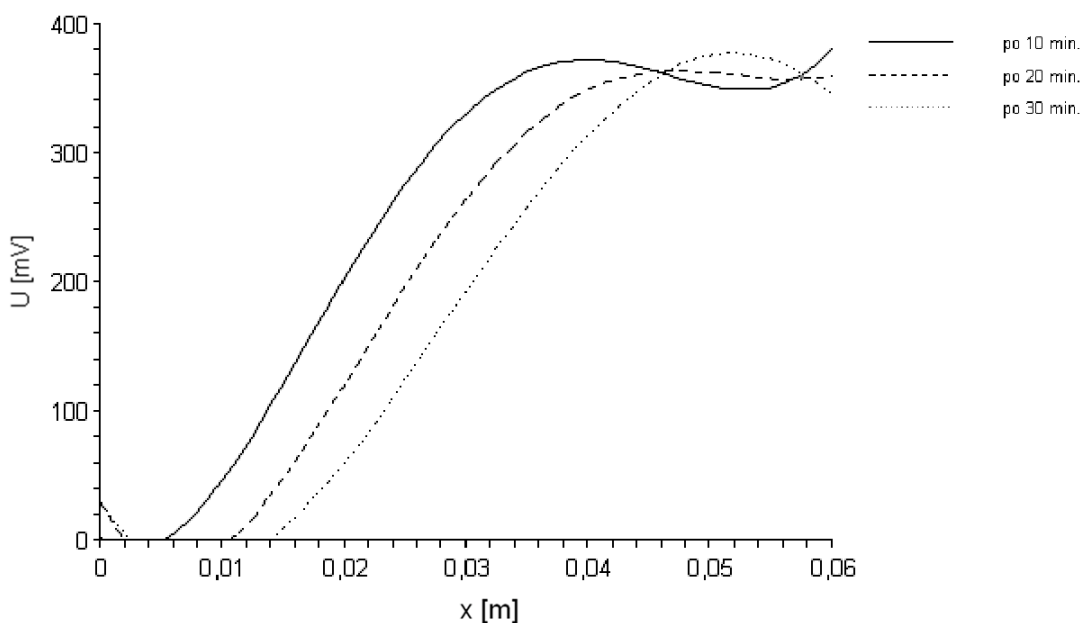
**Obr. 3)** Konstrukční schéma měřící aparatury [23] [26]

Graf 2 je popisuje závislost útlumu EMWR na hmotností vlhkosti při průchodu vzorkem CPP (cihla plná pálená), tzv. kalibrační křivka. Na základě získání kalibrační křivky je možno realizovat rychlé a nedestruktivní měření hmotnostní vlhkosti CPP po délce vzorku a určovat průběhy navlhacích křivek [9] [23].



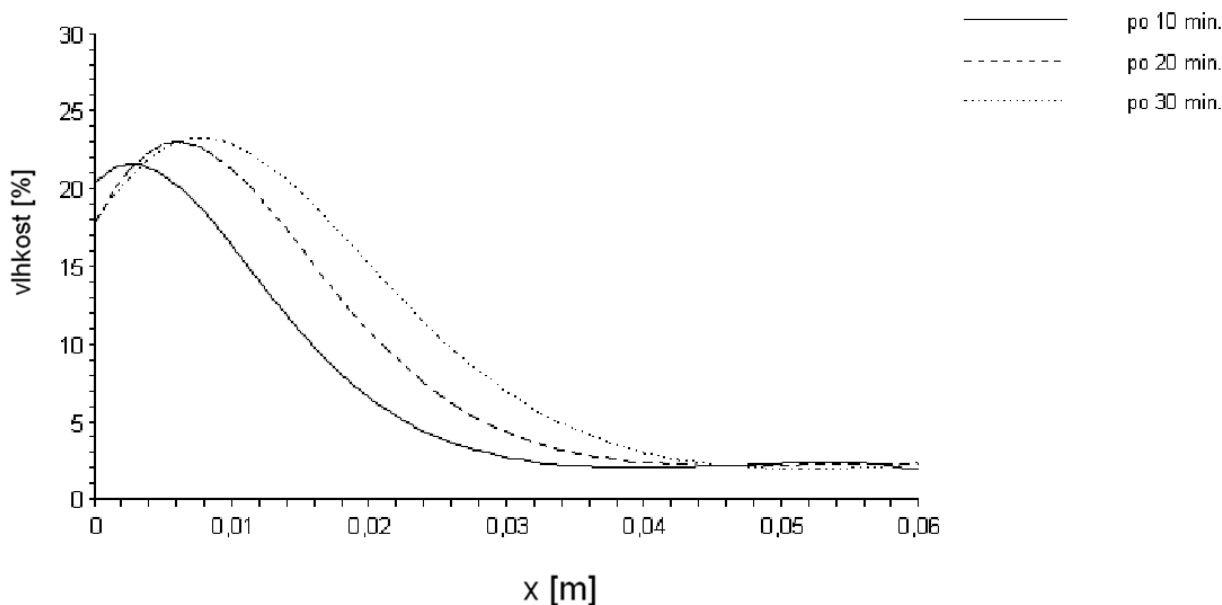
**Graf. 2)** Závislost změny intenzity EMWR vyjádřené v mV na hmotnostní vlhkosti u vzorku CPP – tzv. kalibrační křivka 3. stupně - Srovnávací hladina EMWR nastavena na 450 mV

Pro výpočet součinitele kapilární vodivosti byly z měření profilů vlhkostních čel metodou EMWR při použití experimentální měřicí aparatury (viz obr. 3) stanoveny navlhací křivky. Jedná se o závislost mezi množstvím volné vody vyjádřeným hmotností vlhkostí  $u_m$  ve vzorku a intenzitou EMWR  $z$ , které prochází sledovaným vzorkem (viz graf 3). Stanovené navlhací křivky jsou zobrazeny v graf 4.



**Graf. 3)** Změna intenzity EMWR v závislosti na hmotnostní vlhkosti v délce vzorku CPP





**Graf. 4)** Detekce hmotnostní vlhkosti v délce měřeného vzorku materiálu – navlhací křivky

### 3.4 Stanovení hodnot součinitele kapilární vodivosti

Pro výpočet součinitele kapilární vodivosti je třeba získat dostatečný soubor údajů, které je možné stanovit z průběhu křivky navlhání – tj. jako funkci vyjadřující závislost mezi vlhkostí a vzdáleností od zdroje vlhkosti. Postup pro určení křivek navlhání pomocí experimentálně sestavené měřicí aparatury na principu využití detekce změny intenzity EMWR spočívá ve:

- sestavení metodiky postupu měření k vyjádření transportu vlhkosti v pórovité inertní stavební látce;
- vyhodnocování detekce změn intenzity signálu a vyjádření funkční závislosti EMWR na hmotnostní vlhkosti (obsahu volné vody);
- zpracování výsledků měření, představující volbu a aplikaci vhodných výpočetních metod vycházejících ze známých fyzikálních zákonů;
- výpočet součinitele kapilární vodivosti z podkladů a výsledků měření získaných nedestructivní metodou na experimentálně sestavené měřicí aparatuře.

Pro vyjádření vodivostních poměrů vody v pórovitém vzorku je nutné vyjádřit klíčovou relaci jako funkční závislost, to je provést přepočet intenzity procházejícího mikrovlnného záření na konkrétní obsah vlhkosti. Pro jednotlivé materiály platí individuální vztahy, neboť se v tomto projevuje řada materiálových vlastností, zejména tvar a uspořádání pórů v pórovém systému. Sledovaná závislost byla určena pomocí korelačního vztahu, který nejlépe popisuje tuto funkční závislost a byla zvolena exponenciální funkce s lineárním exponentem.

Pro výpočet součinitele kapilární vodivosti byla uplatněna Matanova metoda, kdy postačí znát jednu křivku navlhání, čas od počátku experimentu a souřadnice průběhu vlhkostního čela, odpovídající této křivce. Matanova metoda využívá Boltzmannovu transformaci, kterou je možno použít v případě krátkých časů, kdy se ještě neuplatní okrajová podmínka na suchém konci vzorku. Matanova metoda se běžně užívá pro případy, kdy lze zaručit, že se neuplatní

okrajová podmínka na suchém konci, jako nestacionární metoda v kombinaci se stanovením hmotnosti volné vody [9] [14].

Rovnici 3.1 sice nelze řešit analyticky pro nekonstantní  $\kappa_m(u)$ , avšak numerické řešení obyčejné diferenciální rovnice je mnohem jednodušší než řešení parciální diferenciální rovnice. Pokud je známo rozložení vlhkosti  $u(x)$  v čase  $\tau$ , lze uplatnit vztah pro  $\kappa_m(u(x))$ :

$$\kappa(u(x)) = \frac{1}{2 \cdot \tau \cdot u'(x)} \int_x^\infty \zeta u'(\zeta) \cdot d\zeta \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.4)$$

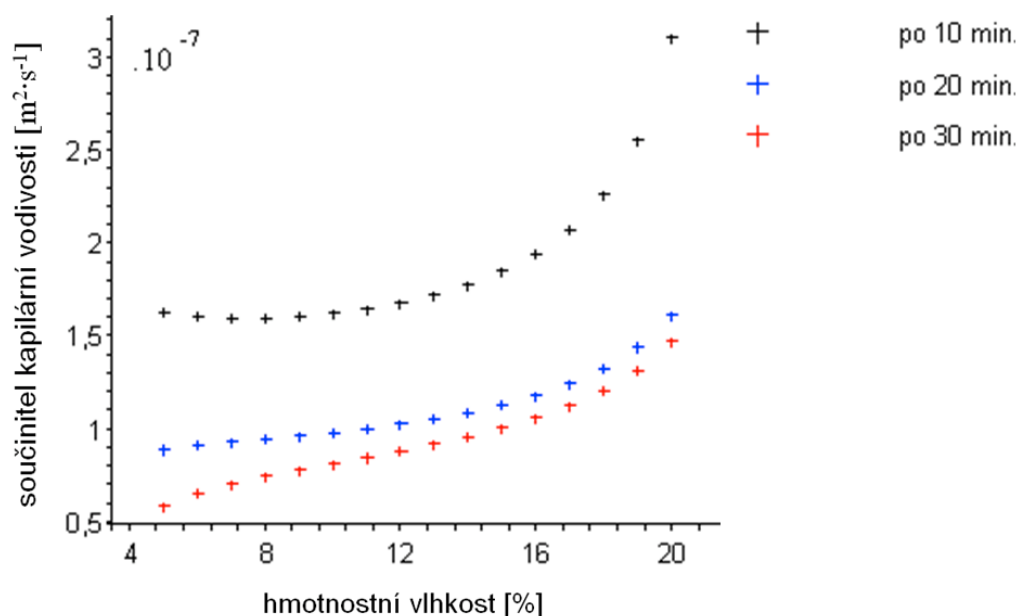
kde  $\tau$  ..... časový interval, ve kterém je vlhkost měřena jako funkce křivky  $u(x)$  v délce konkrétního vlhkostního čela [s],

$\square$  ..... použitá transformační funkce  $\zeta = \frac{x}{\sqrt{\tau}}$ , substituce vzdálenosti měřené

v délce vzorku od bodu na křivce vlhkostního čela  $du$  ve vzorci vyjádřená do  $\infty$ , avšak pro praktické uplatnění je brána do intervalu na měřeném vzorku do vzdálenosti, kde se projeví vlhkost v ustáleném stavu, to je  $u_2$ , to je hodnota relativní vlhkosti měřeného materiálu [-],

$x$  ..... souřadnice v délce vzorku a pro identifikaci její přesné polohy naměřené hodnoty postupu vlhkostního čela, zjistitelné od úrovně spodní plochy měřeného vzorku [m],

$u'$  ..... je derivace vlhkosti podle prostorové souřadnice, z počátku bude  $\infty$  a s přibývajícím časem půjde k 0; substitucí  $x$  za  $\square$  je  $u'$  derivací podle  $\square$ .



**Graf. 5)** Závislost součinitele kapilární vodivosti na hmotnostní vlhkosti

Popis jevu kapilárního transportu v pórovitých látkách je sice v současné době možno řešit na exaktním teoretickém základě, avšak v důsledku silně se měnících určujících veličin

a průřezových tvarů pórů staviv, stejně tak jako jejich spojení a hygroskopické vlastnosti, je nelze vyjádřit pomocí jednoduchých, matematicky dobře vystihujících modelů.

Výška vzlinutí je nezávislá na sklonu kapiláry a závisí na proměnném průřezu kapiláry. U kapilár se změnou průřezu mohou však nastat různé výšky vzlinutí.

Ve srovnání s klasickou (gravimetrickou) destruktivní metodou nabízí metoda s využitím EMWR pro stanovení vstupních údajů k výpočtu součinitele kapilární vodivosti více dat a přesnější údaje o šíření vlhkosti v pórovité látce. Výhodou je poměrně rychlé získání výsledků měření a možnost kontinuálního měření více vlhkostních křivek pro jeden vzorek materiálu.

Podle funkčního prototypu je nyní sestavována inovovaná měřicí aparatura, na které jsou uplatněny nové zdokonalené a upravené komponenty na základě získaných zkušeností. Jedná se zejména o vylepšení mechanických částí aparatury a doplnění potřebného software ke zpřesňování podkladů pro jejich matematické zpracování.

## 4 SNIŽOVÁNÍ VLHKOSTI ZDIVA APLIKACÍ EMR

Dalším příkladem možnosti využití EMWR v oblasti pozemního stavitelství je rychlé snižování vlhkosti stavebních prvků a konstrukcí. Jedná se například o vysokou vlhkost zdiva s funkční hydroizolací po povodních nebo o zbytkovou vlhkost zdiva po provedení sanačního zásahu (např. podřezání zdiva s vložením hydroizolační vrstvy), kdy sice dojde k přerušení dotace zdiva podpovrchovou vodou, ale vlhkost zdiva nad hydroizolací bude přirozeně vysychat ještě několik let v závislosti na hmotnostní vlhkosti, tloušťce zdiva a podmínkách vnějšího prostředí.

V rámci této problematiky bylo realizováno velké množství měření a následně i několik konkrétních aplikací na reálných objektech. Jako příklad jsou uvedeny experimenty, kdy byla ověřována účinnost EMWR při vysoušení vybraných stavebních materiálů. Pro ověřovací experimenty byla využita tzv. tyčová anténa a byly vybrány tři druhy nejčastěji užívaných zdících materiálů, a sice cihly plně pálené, pórobetonové tvárnice Ytong a novodobé keramické tvarovky Keratherm.

Při experimentu bylo užito metody analogie. Zdivo bylo složeno z jednotlivých tvarovek, případně pilířků. Důvodem byla snadnější manipulace s vysoušeným materiálem a lepší možnost kontrolního vážení jednotlivých vzorků v průběhu experimentu pro přesné stanovení objemu odstraněné volné vody. Pro experiment byly použity [20]:

- pilířky z CPP na MVC malta vápenocementová) 2,5 o rozměru 100/300/300 mm,
- tvarovky Ytong o rozměru 300/250/600 mm,
- pilířky z novodobých keramických tvarovek Keratherm 44 P+D (tvarovky byly na horním líci opatřeny vrstvou MVC 2,5 simulující ložnou spáru a další nadložní zdivo).

Všechny vzorky byly navrtány vrtem o průměru 24 mm, do něhož byly při vysoušení umístěny tyčové antény EMWR. U pilířků z cihel plných pálených, z nichž byly vyzděny malé pilířky o třech cihlách spojených vápenno-cementovou maltou, byla navrtána pro umístění EMWR tyčové antény vždy střední cihla.

Veškeré pracovní vzorky byly vlhčeny máčením v plastovém bazénku po dobu 96 hodin. Po této době byly z bazénu vyjmuty a následně byly jednotlivě zabaleny do polyetylenové fólie jednak pro co nelepší prostorové rozložení vlhkosti, jednak pro udržení stabilní vlhkosti.

Pro vysoušení bylo užito zářiče EMWR s maximálním výkonem 1200 W a s možností regulace výkonu v celém rozsahu. Průběh a způsob vysoušení EMWR zařízením osazeným zásuvnou tyčovou anténou je dobře patrný z fotografií na obr. 4.



**Obr. 4)** Způsob vysoušení pomocí EMWR se zásuvnou tyčovou anténou [18] [20] [19] [24]

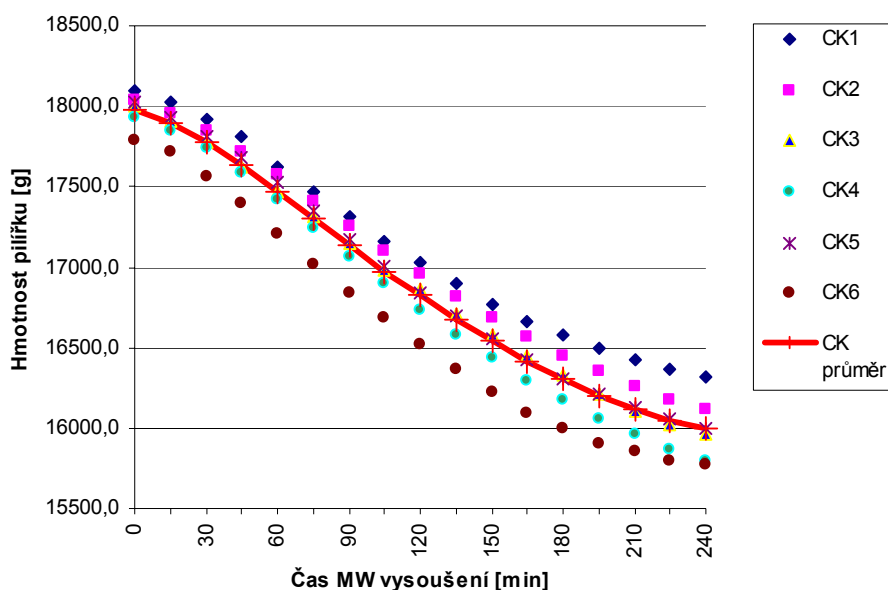
Vysoušení s využitím EMWR probíhalo vždy v časovém úseku 240 minut. Interval 240 min. byl rozdělen na 16 vysoušecích cyklů o délce 15 min. Jeden vysoušecí cyklus byl dále rozdělen na 12 min. vysoušení a 3 min. přestávku. V průběhu experimentu, byly sledovány tyto charakteristiky:

- hmotnosti jednotlivých prvků;
- hmotnostní úbytky v čase sušení;
- hmotnostní vlhkost – metodou karbidovou;
- hmotnostní vlhkost – gravimetrickou metodou.

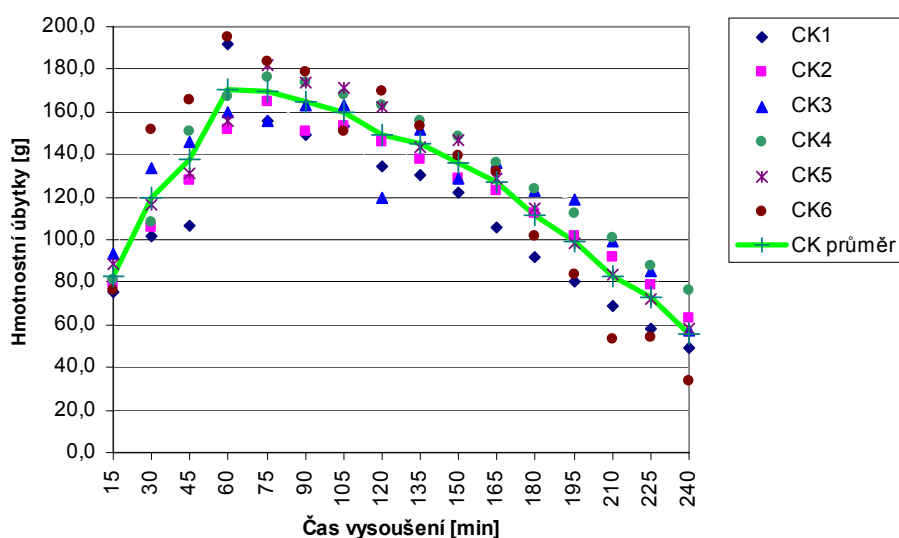
Jednotlivé experimentálně získané hodnoty byly následně porovnávány s výpočtovou simulací pro stanovení účinnosti EMWR při vysoušení. Účinnost EMWR vysoušení byla určována samostatně pro jednotlivé druhy ověřovaných stavebních materiálů. Pro tento experiment byly použity následující přístroje:

- - mikrovlnné vysoušecí zařízení s plynulou regulací výkonu polské firmy Plazmatronika sestávající z:
  - MWD 2000 GMR 1200 (10-1200 W) [13] [24],
  - zásuvné tyčové antény,
- - vlhkoměrná souprava Gann Hydromat CM;
- - digitální váhy Kern 572 DS;
- - digitální váhy Sartorius 500 kg.

Pro přehlednost byly výsledky členěny dle jednotlivých zdících materiálů a v závěru jsou uvedeny odvozené společné výsledky pro všechny tři zkoumané druhy zdiva, které byly následně využity při aplikacích na reálných objektech. Průběh vysoušení (odstraňování volné vody) u dílčího experimentu na pilířcích z CPP patrný z grafického znázornění v grafů 7 a 8 [20] [24].



**Graf. 6)** Poklesy hmotnosti jednotlivých pilířků v čase EMWR vysoušení a křivka průměrného poklesu hmotnosti pilířků z CPP [20] [24].

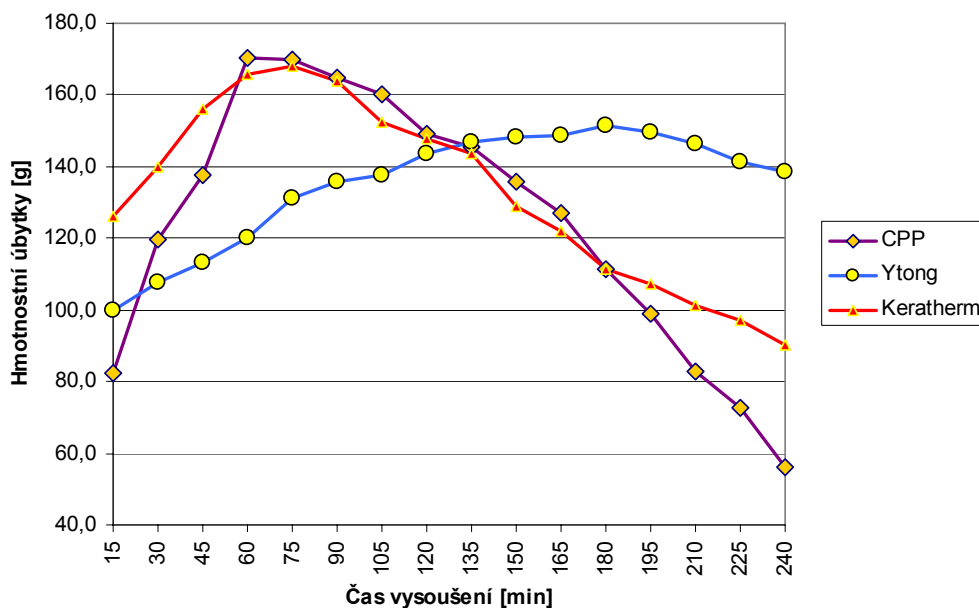


**Graf. 7)** Průběhy úbytků vlhkosti v pilířcích z CPP v čase při EMWR vysoušení a křivka průměrných úbytků vlhkosti na pilířcích z CPP [20] [24].

V průběhu experimentu byla sledována také hmotnostní vlhkost daných zkušebních vzorků. Počáteční rovnovážná vlhkost byla zjištěna karbidovou metodou, následně byly postupně vlhkostní změny určovány gravimetricky. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

**Tab. 1)** Průměrné hmotnostní vlhkosti vzorků zdiva v průběhu EMWR sušení

Označení tvarovek	CPP	Ytong	Keratherm
Rovnovážná vlhkost [%]	3,6	2,4	2,9
Vlhkost po vlhčení [%]	14,9	60,6	21,1
Úbytek vlhkosti [%]	12,7	10,0	10,0
Zbytková vlhkost [%]	2,3	50,7	11,1



**Graf. 8)** Přehled průběhu hmotnostních úbytků vlhkosti v jednotlivých typech zdiva při EMWR vysoušení

Při porovnání hmotnostních úbytků vlhkosti při EMWR vysoušení všech tří druhů zdiva bylo zjištěno, že nárůsty hmotnostních úbytků vlhkosti jsou podobné u zdiva z CPP a tvarovek Keratherm, průběh hmotnostních úbytků byl téměř shodný, a také maxima hmotnostních úbytků byla téměř shodná. U tvárnice Ytong byl nárůst hmotnostních úbytků velmi pozvolný a jejich maxima dosáhla nižších hodnot. Toto porovnání bylo zachyceno v grafu 8.

Účinnost EMWR vysoušení na jednotlivých typech zdiva byla určována pomocí orientačního výpočtu, jež vychází z porovnání hmotnosti teoreticky odpařené volné vody při známém výkonu EMWR a skutečného hmotnostního úbytku zjištěného na zkoušených vzorcích při jednotlivých experimentech. Na základě této analogie je možné alespoň přibližně stanovit skutečnou účinnost EMWR vysoušení na daný druh zdiva.

$$P_v = \frac{l_v \cdot m}{t} \quad [\text{W}] \quad (4.1)$$

kde  $P_v$  ... výkon vysoušecího zařízení [W],  
 $l_v$  ... měrné skupenské teplo vypařování vody [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ],  
 $m$  ... hmotnost vypařené vody (hmotnostní úbytky) [kg],  
 $t$  ... čas vysoušení [s]. [12] [14]

Úpravou výše uvedeného vztahu bylo možno přibližně stanovit účinnost EMWR vysoušení:

$$\eta = \frac{P_v}{P_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.2)$$

kde  $\eta$  ... účinnost EMWR vysoušení na daném druhu zdiva [%],  
 $P_s$  ... skutečný výkon EMWR určený z úbytku hmotnosti [W]. [12] [14]

Průměrná účinnost EMWR vysoušení zjištěná z 30 vzorků každého druhu zdiva v průběhu experimentu je uvedena v tabulce 2.

Pro zvýšení přehlednosti byly vždy jednotlivé účinnosti v daném vysoušecím cyklu na každém ze tří typů zdiva zprůměrnovány z jednotlivých hodnot účinností v průběhu vysoušení na jednotlivých vzorcích pro daný typ zdiva.

**Tab. 2)** Průměrné hodnoty účinnosti EMWR vysoušení [%] na jednotlivých druzích zdiva v čase (testováno 30 vzorků od každého druhu zdiva)

Vysoušecí cyklus	Materiál	CPP	Ytong	Keratherm
	Délka vysoušení [min]			
<b>Průměrná účinnost MW vysoušení [%]</b>		<b>38,7</b>	<b>42,1</b>	<b>41,4</b>

V rámci experimentu byla orientačním výpočtem stanovena účinnost EMWR vysoušení s využitím zásuvné tyčové antény. Experimentálně bylo zjištěno, že účinnost tyčové antény je přibližně stejná na všech třech druzích vysoušeného zdiva. Absolutní hodnoty účinnosti EMWR při vysoušení se u jednotlivých druhů zdiva pohybovaly přibližně od 30 do 60 %. Následně byly stanoveny průměrné hodnoty účinnosti EMWR vysoušení pomocí zásuvné tyčové antény na všech třech druzích zdiva. Pro dosažení přesnějších hodnot by bylo nutné vysoušet všechny druhy zdiva až téměř do suchého stavu, respektive do stavu rovnovážné vlhkosti (tak jak se stalo u zdiva z CPP).

Na základě experimentálního ověření je tedy možno objektivně konstatovat, že se potvrdily teoretické předpoklady a EMWR vysoušení běžných druhů zdiva s využitím zásuvné tyčové antény je rychlé, poměrně účinné a lze ho s výhodou užít i na vysoušení zdiva z dutinových tvarovek.

## 5 VYUŽITÍ EMWR PRO LIKVIDACI BIOTICKÝCH ŠKŮDCŮ

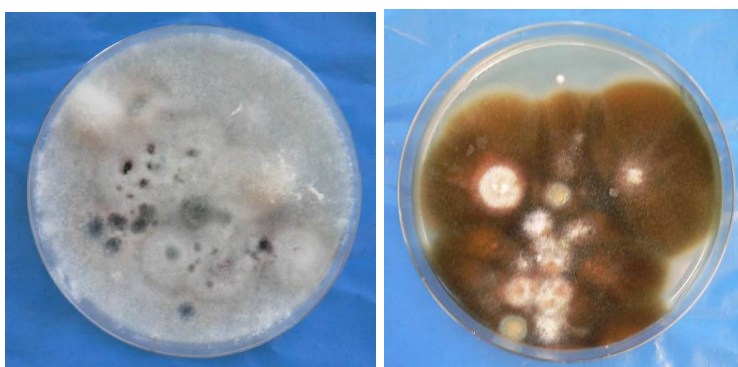
Třetím příkladem využití EMWR ve stavební praxi, kterým se se svými spolupracovníky zabývám, je likvidace biotických škůdců. Zvýšená relativní vlhkost interiérových prostor, související s nedostatečným větráním interiéru a těsností novodobých oken a dveří, která má následně vliv na zvýšenou vlhkost stěn, je jedním z problémů současného pozemního stavitelství. Vlhké prostory jsou živnou půdou pro růst nebezpečných plísní. Plísň v mnoha případech velmi negativně ovlivňují zdravotní stav osob, pohybujících se v takto napadených objektech. V rámci prováděných stavebně technických průzkumů byly odebírány vzorky vyskytujících se plísní. Následně byly stanoveny možné způsoby jejich trvalé likvidace včetně využití EMWR o tzv. průmyslové frekvenci 2,45 GHz.

Z vlhkých ploch s vizuálně patrným výskytem plísní byly odebírány vzorky omítek a zdiva. Vzorky byly odebírány do sterilních plastových ampulí a ve spolupráci s mikrobiologickou laboratoří vyhodnocovány. Plísň na celých i oddělených vzorcích zdiva a omítek byly podrobeny analýze a byly určeny nejčastěji se vyskytující druhy.



**Obr. 5)** Sterilní ampule s odebraným vzorkem [28]

Odebrané plísně byly naočkovány na živné kultivační půdy a následně byly vypěstovány směšné kultury plísni z odebraných vzorků. Následně byla provedena separace a kultivace čistých kultur.



**Obr. 6)** Vypěstované vzorky plísni na Petriho miskách [28]

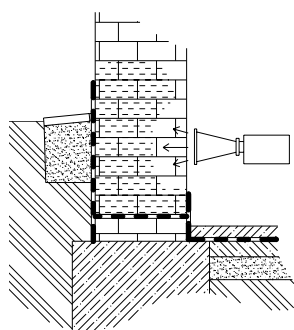
Mezi nejčastěji vyskytujícími se kulturami plísni byly identifikovány:

- *Alternaria alternata*,
- *Aspergillus versicolor*,
- *Cladosporium cladosporioides*,
- *Penicillium brevicompactum*,
- *Penicillium chrysogenum*,
- *Stachybotrys chartarum*.

Experimentální likvidace a ověření účinnosti užití EMWR probíhala tak, že na jednotlivé vzorky na Petriho miskách bylo aplikováno EMWR. Následně byly vzorky opět podrobeny kultivaci za účelem zjištění účinku a úspěšnosti likvidace vzorků plísni.

Pro likvidaci plísni prostřednictvím EMWR je používán certifikovaný přístroj firmy Plazmatronika MWD 2000 GMR 1200 (10-1200 W), byl osazen trychtýřovou příložnou anténou.





**Obr. 7)** Schematický obrázek a foto EMWR zařízení s trychtýřovou anténou

Pro výše uvedené experimenty byly na základě předchozích zkušeností zvoleny různé výkony EMWR o hodnotách 400, 700 a 1200 W.

V rámci experimentů bylo dílčím cílem využít co nejnižší výkon EMWR při likvidaci biotických škůdců. Důvodem je relativně pozvolný nárůst teplot ve hmotě zdiva, dochází tak pouze k menšímu teplotnímu namáhání zdiva. Aplikace EMWR byla prováděna cyklicky. Celková délka aplikace EMWR činila osm cyklů po 30 minutách. Doba aplikace EMWR vychází z dlouholetých zkušeností – ve zvolené časové periodě dochází pouze k relativně mírnému nárůstu teplot ve zdivu (teplota ve hmotě zdiva max. cca 90 °C).

První fáze experimentální likvidace plísní proběhla na čistých kulturách, které jsou umístěny na živných půdách umístěných na Petriho miskách. Základním předpokladem bylo odstranění volných živných půd, aby nedocházelo k ovlivnění experimentu vedlejšími vlivy, zejména při užití aplikace EMWR. V rámci porovnání účinnosti EMWR byly shodně získané vzorky kultivovaných plísní rovněž likvidovány chemickými prostředky, běžně dostupnými na trhu.



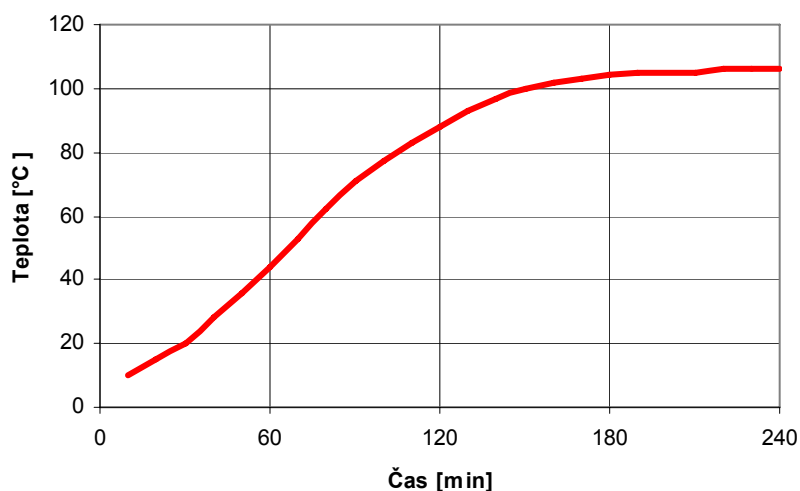
**Obr. 8)** Aplikace EMWR na vzorky plísní [28]

Experimenty byly prováděny na šesti vzorcích. Následně byly vždy po 10 dnech z jednotlivých ošetřených vzorků odebrány dílčí vzorky, které byly podrobeny následné kultivaci pro ověření účinnosti likvidace plísní.

**Tab. 3)** Účinnost likvidace na čistých kulturách jednotlivých plísní

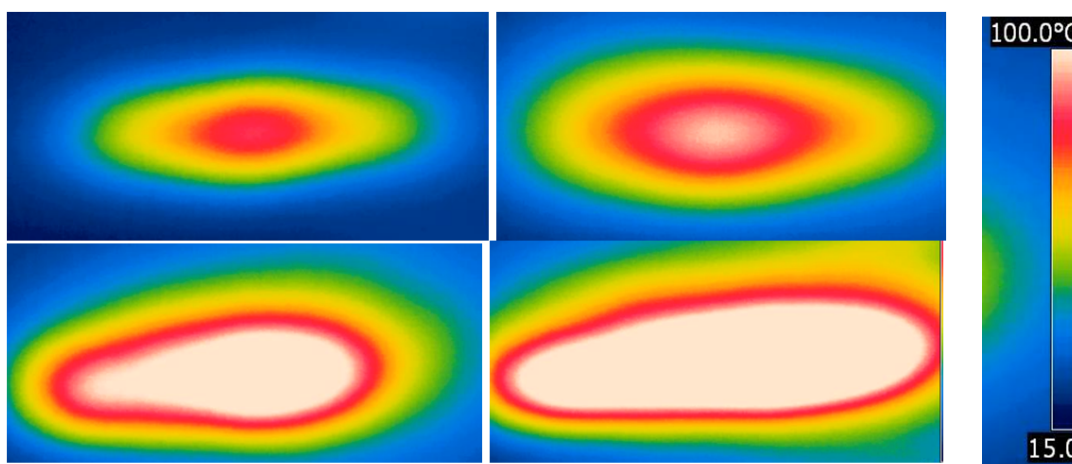
Likvidace na čistých plísňových kulturách [%]						
	Alternaria Alternata	Aspergillus versicolor	Cladosporium cladosporioides	Penicilium brevicompactum	Penicillium chrysogenum	Stachybotrys chartarum
EMW záření 400 W	72	89	50	66	38	89
EMW záření 700 W	100	100	66	94	55	100
EMW záření 1200 W	100	100	94	100	94	100

Účinnost likvidace plísní je v rámci experimentu v tabulce 3 vyjádřena procentuálním podílem úspěšnosti likvidace jednotlivých druhů plísní a příslušnou intenzitou EMWR.



**Graf. 9)** Nárůst teplot při aplikaci EMWR o výkonu 700W [27] [28]

Z grafu 11 je patrný pozvolný nárůst teplot v čase aplikace EMWR. Je zřejmé, že při dosažení teploty vzorku mírně nad 100 °C, dochází ke stabilizaci teploty, tzn. že teplota v čase zůstává prakticky konstantní.



**Obr. 9)** Termovizní snímky v průběhu likvidace plísní s využitím EMWR [27] [28]

Z průběhu likvidace byly pořízeny také termovizní snímky, které velmi dobře dokumentují rozložení teplot na daném vzorku plísní při jeho likvidaci prostřednictvím EMWR.

Na základě výsledků ověřovacích experimentů je možno objektivně konstatovat, že aplikace EMWR o frekvenci 2,45 GHz se ukazuje jako vysoce účinná pro likvidaci plísní, zejména v případě čistých plísníových kultur. V současnosti je prováděna řada obdobných experimentů na směsných kulturách a následně na vzorcích zdiva, a dále pak také „in situ“ na napadeném zdivu. Výsledky jsou zatím velmi pozitivní, tedy účinnost likvidace je vysoká.

S ohledem na výsledky provedených experimentů je zřejmé, že při aplikaci EMWR o výkonu 1200 W se účinnost blíží 100 %. Proto je možno rovněž oprávněně předpokládat, že při prodloužení délky ozařovacího cyklu, by velmi pravděpodobně došlo k likvidaci i zbylých plísníových kultur.

## 6 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU A PRO PRAXI

Možnosti využití EMWR ve stavební praxi je dlouholetým tématem naší činnosti v oblasti výzkumu a vývoje na Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební. Moje práce navazuje na práci Mgr. Václava Božka, CSc. a doc. Ing. Ivana Moudrého, CSc. a na dlouholetou spolupráci s předčasně zesnulým prof. Ing. Jiřím Svačinou, CSc. z FEKT VUT v Brně, se kterým jsme řešili obecnou problematiku EMWR.

Výzkumem a vývojem využití EMWR v oblasti pozemních staveb ve výše uvedených oblastech se v ČR i v zahraničí zabývá pouze omezený počet pracovišť (např. v ČR Lesnická fakulta Mendelea v Brně v oblasti likvidace biotických škůdců ve dřevě), dílčí pracoviště ve Švédsku (Lund University, Malmö and Helsingborg) nebo Austrálii (Swinburne University, Hawthorn), kde se jednalo o doktorské práce zaměřené primárně na účinky EMWR na živé organismy. Proto se stále potýkáme s nedostatkem publikovaných informací. Přes trvalou snahu se nám nepodařilo, až na drobné výjimky, navázat funkční spolupráci s jinými pracovišti, která by se zabývala touto problematikou.

Přes tato omezení se průběhu cca 25 let podařilo vybudovat na Ústavu pozemního stavitelství specializované výzkumné a vývojové pracoviště v oblasti využití EMWR ve stavební praxi, jehož činnost dlouhodobě řídím a garantuji. Současně s budováním specializovaného pracoviště se postupně podařilo získat ke spolupráci úspěšné absolventy doktorského studijního programu, kteří se ve svých disertacích touto problematikou zabývají. V současné době, v důsledku výzkumu a vývoje v oblasti EMWR na tomto pracovišti, vzniklo několik užitečných vzorů, patentů národních i evropských a připravují se další přihlášky. Některé aplikace se nám daří uvádět do praxe formou intenzivní dlouhodobé spolupráce se stavební praxí. Výsledkem výzkumu a vývoje v oblasti využití EMWR je rovněž poměrně široká publikační činnost výzkumného týmu na mezinárodních konferencích a vědeckých .

Svou tvůrčí práci jsem přispěl k prohloubení poznání v oblasti aplikace ENWR při sanacích vlhkého zdiva a likvidaci biotického napadení stavebních objektů. V tomto oboru jsem byl školitelem 5 doktorandů, kteří úspěšně obhájili svoji disertační práci. Někteří z nich jsou perspektivními pracovníky Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně a v současné době již pracují na přípravě habilitačních prací. Výsledky práce našeho tvůrčího týmu, zabývajícího se problematikou využití ENWR v oblasti pozemního stavitelství, jsou základem pro další rozšíření výzkumné a vývojové činnosti Ústavu pozemního stavitelství, spočívající v získávání projektů VaV financovaných ze státních i privátních zdrojů.

## 7 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Závěrem považuji za nezbytné nastínit koncepci své další vědecké a pedagogické činnosti v oboru Pozemní stavby v rámci svého působení na Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně do budoucna. V oblasti VaV bych chtěl pokračovat v dosavadní činnosti a zaměřit se zejména na:

- další rozvoj poznatků v oblasti vývoje a možností využití EMWR ve stavební praxi včetně inovace a modernizace přístrojového vybavení, zejména v rámci regionálního výzkumného centra AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies),
- oblast výchovy studentů v doktorském studijním programu, kterou považuji za rozhodující a nadále podstatně přispívat k úspěšnosti tohoto studia;
- ve spolupráci s kolegy z ústavu a fakulty, případně z tuzemských i zahraničních pracovišť, intenzivně připravovat projekty financované z evropských, tak tuzemských zdrojů;
- snahu o rozšíření počtu uplatněných významných výsledků VaV, tj. článků ve významných vědeckých časopisech (nejlépe impaktovaných), užitečných vzorů a patentů, případně ověřených metodik a technologií;
- pokračování ve spolupráci s konkrétními partnery na zahraničních univerzitách – např. Polytechnika Krakov, VGTU Vilnius, DTU Lyngby, TU Wien a rozvoj této spolupráce dále rozšiřovat včetně výměny zejména studentů DSP;
- v rámci spolupráce se stavební praxí pokračovat ve zpracování znaleckých i expertních posudků, dílčích částí projektových dokumentací významných staveb (zvláště obtížných např. z hlediska užitých materiálů nebo technologií).

V oblasti pedagogické rovněž předpokládám, že budu pokračovat v dosavadní činnosti, a dále se zaměřím zejména na:

- další zkvalitnění výuky s využitím moderních pomůcek včetně prezentací konkrétních případů s cílem vychovávat absolventy schopné samostatného inženýrského přístupu k práci a konkurenceschopné v rámci EU;
- přípravu nových předmětů a následně i oboru studia, které budou lépe akcentovat současné požadavky stavební praxe, zejména se zaměřením na:
  - stavby inteligentní,
  - stavby šetrné k životnímu prostředí,
  - stavby navrhované z obnovitelných a recyklovaných materiálů s nízkou spotřebou energie,
  - stavby se zdravým vnitřním prostředím.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SVAČINA, J., RŮŽIČKA, V., PUNČOCHÁŘ, J., – *Teorie obvodů V a technika velmi krátkých vln*, Brno 1980,
- [2] OLOYEDE, A., GROOMBRIDGE, P., – *The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood*. Journal of Materials Processing Technology 100, Elsevier 2000.
- [3] KIESSL, K., *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung*, Dissertation Universität, Fachbereich Bauwesen, Essen 1983
- [4] KÜNZEL, H., *Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen*, Bauphysik 8 (1986), Heft 2, S.33-39
- [5] CAMMERER, W. F., *Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern*, VDI-Forsch., Heft 500, 29, 1963
- [6] Gertis, K., Kiessl, K., *Feuchtetransport in Baustoffen*, Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen, 1980
- [7] HEIZMANN, P., *Die Bewegung vom flüssigen Wasser in kapillarporösen Körper unter dem Einfluss kapillarer Zugkräfte sowie dem Einfluss von Zentrifugalkräften*, Holzals Roh- und Werkstoff, Band 28 (1970), s.295-309
- [8] KALOUSEK, V., DĚDEK, L., MIHULA, Z., *Teorie elektromagnetického pole*, Praha, 1981
- [9] ŠŤASTNÍK, S., *Modelování šíření vlhkosti ve stěnových stavebních konstrukcích*, habilitační spis VUT Brno, 1993
- [10] Nařízení vlády č.480/2000 Sb. *O ochraně zdraví před neionizujícím zářením*, ze dne 22. listopadu 2000
- [11] Informace Národní referenční laboratoře pro neionizující elektromagnetické pole záření, *NRL č.1/1999, NRL č.3/1999, NRL č. 9/2001*.
- [12] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : Mechanika - Termodynamika, část 2*. 1. vyd. Z angl.orig. Fundamentals of Physics přel. J. Obdržálek; P. Dub. *Fyzika : Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita, část 4*. 1. vyd. Z angl. orig. Fundamentals of Physics přel. J.Komrská; J. Obdržálek; P. Dub. Brno: VUT v Brně, VUTIUM, 2003 ISBN 80-214-1868-0
- [13] Firemní dokumentace ke generátorům mikrovln Firmy PLAZMATRONIKA.
- [14] MRLÍK, F. - *Vlhkostné problémy stavebních materiálů a konstrukcí*, 1. vyd., Alfa, Bratislava 1985, ISBN # 9955.
- [15] ČSN P 73 36 10. *Hydroizolace staveb sanace vlhkého zdiva, základní ustanovení*. Český normalizační institut Praha.
- [16] LEBEDA, J. a kolektiv - *Sanace zavlhlého zdiva budov*, 1. vyd., Praha: SNTL, 1988. ISBN # 7246 : 26.00
- [17] WITZANY, J. - *Poruchy a rekonstrukce zděných budov*, 1. vyd., Praha: ČKAIT 1999, ISBN 80-902697-5-3

- [18] NOVOTNÝ, Miloslav., ŠUHAJDA, Karel., TOMÍČEK, Oldřich, Sledování účinnosti mikrovlnného vysoušení pomocí tyčové antény. *Stavební obzor* 4/2007, p.121-125; INDEX 47 755 ISSN 1210-4027
- [19] ŠKRAMLÍK, Jan, NOVOTNÝ, Miloslav, ŠUHAJDA, Karel, Měření vlhkosti stavebních materiálů absorpční mikrovlnnou metodou. *Stavební obzor* 1/2008, p.1-7; INDEX 47 755 ISSN 1210-4027
- [20] ŠUHAJDA, Karel, NOVOTNÝ, Miloslav, ŠKRAMLÍK, Jan, Monitoring of Effectivity of Microwave Desiccation by Means of plug-in Antenna. *The e-Journal&Exhibition on Nondestructive Testing- Web's Largest Searchable Databáze of NTD literature, Products and Services*, Dokument ID:5946 – dostupné na Internetu [www.ntd.net](http://www.ntd.net) .ISSN 1435-4934
- [21] ŠKRAMLÍK, Jan, NOVOTNÝ, Miloslav, Moisture transfer monitoring into porous materials. *The e-Journal&Exhibition on Nondestructive Testing- Web's Largest Searchable Databáze of NTD literature, Products and Services*, Dokument ID:4803 – dostupné na Internetu [www.ntd.net](http://www.ntd.net) .ISSN 1435-4934
- [22] ŠKRAMLÍK, Jan, NOVOTNÝ, Miloslav. Monitoring of One-dimensional Moisture Transport using a Non-destructive Method. 2008 International Conference on Engineering and Mathematics, ENMA 2008, Bilbao 07/2008, str.162-168, vydáno KOPIAK, S.A., Marqués del Puerto, 9 Bilbao – ISBN 978-84-612-5331-9
- [23] ŠKRAMLÍK, Jan, FUCIMAN, Ondřej, NOVOTNÝ, Miloslav, Vliv kapilární vodivosti na tepelně technické vlastnosti stavební konstrukce. *Stavební obzor* 7/2009, p.210-212; INDEX 47 755 ISSN 1210-4027
- [24] ŠUHAJDA, Karel, NOVOTNÝ, Miloslav. Monitoring of Effectivity of Microwave Desiccation by Means of rod plug-in Antenna. *SEMC 2007 International Conference, JAR, Kapské Město 10-12/09/2007* –str.613-614; vydáno Millpress Science Publisher, Rotterdam, Netherlands ISBN 978 90 5966 054 0
- [25] ŠKRAMLÍK, Jan, NOVOTNÝ, Miloslav, Moisture transport within building materials. Concrete under Severe Conditions, p.1131-1140, 06/2010 Merida, Mexiko; 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 987-0-415-59316-8
- [26] NOVOTNÝ, Miloslav, ŠKRAMLÍK, Jan, ŠUHAJDA, Karel, Distribution of Moisture in Building Materials. Proceedings of the 2011 International Conference on Engineering and Mathematics. p.9-14 ,Bilbao 06/2011, Španělsko;KOPIAK, S.A., Bilbao, ISBN 978-84-937328-5-1
- [27] NOVOTNÝ, Miloslav, ŠUHAJDA, Karel, ŠKRAMLÍK, Jan, HANULÁKOVÁ, Dana. Experimental Elimination of Moulds Using Microwave Radiation. Proceedings of the 2011 International Conference on Engineering and Mathematics. p23-27 ,Bilbao 06/2011, Španělsko;KOPIAK, S.A., Bilbao, ISBN 978-84-937328-5-1
- [28] ŠUHAJDA, Karel, NOVOTNÝ, Miloslav, HANULÁKOVÁ, Dana, The Occurrence of Fungi in the Military Facilities and ITL disposal Options. International Conference on Military Technologies 2011 (ICMT 2011). p. Faculty of Military Technologies, University of Defence in Brno 05/2011 ISBN 978-80-7231-787-5. vol. 1581-1588.
- [29] ŠKRAMLÍK, Jan, NOVOTNÝ, Miloslav, ŠUHAJDA, Karel. Modeling of Diffusion in Porous Medium. International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics - ICNAAM 2011, p.1869-1873 – American Institute of Physics, Halkidiki 09/2011, Greece, ISBN 978-0-7354-0954-5

## ABSTRACT

Elektromagnetic Microwave Radiation - EMWR signifies electromagnetic waves with frequencies between 300 MHz to 30 GHz. In the spectrum of electromagnetic waves, microwaves lies between radio waves at lower frequencies, and infrared radiation with a higher frequency.

EMWR spreads from the source in the form of waves, which means that the parameters of both the electric and magnetic components of waves are periodically changing in time. Sinusoidal behaviour of waves is assumed with a certain wavelength and frequency, which determines the frequency of changing waves. For use in construction practice there is used so-called "industrial frequency" 2450 MHz with a wavelength set while spreading within free-space of 122 mm. The frequency of 2450 MHz is very suitable for water heating and it also does not coincide with telecommunication frequencies. For the detection of moisture (free water content) there are within the building industry also used frequencies around 10 GHz.

At the Institute of Building Constructions, Faculty of Civil Engineering there has been developed specialized laboratory that uses EMWR within building constructions, mainly in the field of high moisture remediation within building constructions. In the long term at the Institute of Building Constructions, Faculty of Civil Engineering we are focused on usage of EMWR in following basic areas:

- EMWR method for detecting moisture content (content of free water) in porous building materials, is using the fact that the magnitude of EMWR declination when passing through porous substance (a large group are the building materials) is directly dependent on the amount of free water in the pore structure, so called moisture of the substance, thus allowing rapid response of the necessary information on moisture transport without handling the sample, and also in elimination of the reference sample destruction; at different time intervals from the beginning of wetting and from the results of experiments it is possible to obtain parameters for the determination of capillary conductivity coefficient, which has essential influence on the thermal technical characteristics of the construction material, in particular on thermal conductivity  $\lambda$ ;
- Method of reducing excessive moisture (free water content) in construction elements and structures using EMWR, using the properties that EMWR very fast effects free water molecules, since there appears a rapid and disordered movement of molecules which results in formativ of thermal energy, which causes rapid heating of free water located in the pore structure of the substance, in its entire volume, ie. that the highest temperature is besides to the common heating inside the porous substance and heading to the surface the temperature decreases and at the same time, it is a selective effect; EMWR only absorbs free water (fixed structure is warmed by heated free water or steam) and while the amount of free water in the material decreases there is also reduced the generation of thermal energy;
- Method of disposal of biotic pests (disinfection and disinsection) in building elements and structures using EMWR, is using tha fact that EMWR very quickly effects free water molecules; living organisms contain large amount of water, EMWR water heating causes disruption of cell structure and gradually these organisms die, which is very effective in destruction of biotic pests (wood-destroying insects, fungi and mold).

EMWR has due to its unique features great potential for use in construction practice within the areas mentioned above, on which development I will continue - along with a group of workers at the Institute of Civil Engineering – to actively participace.