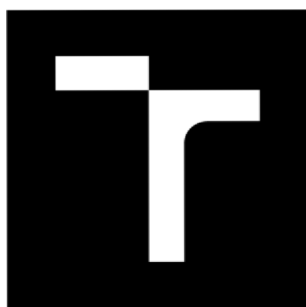




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV CHEMIE**  
INSTITUTE OF CHEMISTRY

# **VLIV ETHERŮ CELULÓZY NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI VÁPENNÝCH MALT**

Effect of cellulose ethers on the mechanical properties of lime mortars

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
bachelor's thesis

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JAKUB SKOUPIL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Mgr. MARTIN VYŠVAŘIL, Ph.D.**

BRNO 2017



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav chemie

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	<b>JAKUB SKOUPIL</b>
<b>Název</b>	Vliv etherů celulózy na mechanické vlastnosti vápenných malt
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2016
<b>Datum odevzdání</b>	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

.....  
doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- M.P. Seabra, H. Paiva, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira. Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1147–1153.
- A. Izaguirre, J. Lanás, J.I. Álvarez. Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 1095–1104.
- A. Izaguirre, J. Lanás, J.I. Álvarez. Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents. *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 309–318.
- D. Bülichen, J. Kainz, J. Plank. Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose (MHEC) as water retention agent. *Cement and Concrete Research* 42 (2012) 953–959.
- E. Spychał, The effect of lime and cellulose ether on selected properties of plastering mortar. *Procedia Engineering* 108 (2015) 324–331.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provedte literární rešerši na téma využití různých druhů etherů celulózy jako vodoretenčních přísad do stavebních materiálů. Podrobněji se zaměřte na ovlivnění vlastností vápenných malt a omítkových směsí na bázi vápna. Uveďte mechanismy retence vody v maltách a její pozitivní a negativní vliv na vlastnosti malt. Podrobně popište jednotlivé druhy etherů celulózy používané ve stavebnictví včetně jejich vlastností a přípravy. Pro vypracování teoretické části bakalářské práce použijte zadanou literaturu a doplňte ji o vlastní literární rešerši k tématu. V praktické části vyrobte zkušební tělesa vápenných malt s přidávkem různých druhů etherů celulózy a stanovte jejich fyzikálně mechanické vlastnosti (zejména pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, objemovou hmotnost a nasákavost). Výsledky porovnejte v tabulkách a grafech, okomentujte a zhodnoťte. Na konci práce uveďte soupis použité literatury. Bakalářskou práci zpracujte na cca 40 až 50 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....  
**Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.**  
**Vedoucí bakalářské práce**

## **Abstrakt**

Cílem bakalářské práce je provedení rozsáhlé literární rešerše na téma vlivu etherů celulózy na mechanické vlastnosti vápenných malt. Teoretická část je věnována složení a výrobě etherů celulózy, které jsou dostupné na průmyslovém trhu. Na základě provedených rešerší byl proveden návrh vápenných malt s použitím různých druhů etherů celulózy a po vyzrání byly provedeny zkoušky mechanických vlastností.

## **Abstract**

The subject of the thesis is to conduct an extensive literature review on the topic of effect of cellulose ethers on the mechanical properties of lime mortars. The theoretical part is devoted to the composition and production of cellulose ethers, which are available on the industrial market. On the basis of the review, the design of lime mortars using different kind of cellulose ethers has been conducted and after curing the tests of mechanical properties of mortars were performed and evaluated.

## **Klíčové slova**

Celulóza, ethery celulózy, vápenná malta, mechanické vlastnosti

## **Key words**

Cellulose, cellulose ethers, lime mortar, mechanical properties

### **Bibliografická citace**

**Jakub Skoupil *Vliv etherů celulózy na mechanické vlastnosti vápenných malt*. Brno, 2017.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie.  
Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.**

### **Čestné prohlášení**

**Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně.**

**Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).**

**V Brně dne 26. května 2017**

.....

**podpis studenta**

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Mgr. Martinu Vyšvařilovi, Ph.D., za odborné vedení, připomínky, rady a ochotnou spolupráci při vzniku této bakalářské práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
2.1	CELULÓZA .....	10
2.1.1	<i>Struktura celulózy</i> .....	10
2.1.2	<i>Zdroje celulózy</i> .....	11
2.1.3	<i>Chemické vlastnosti</i> .....	11
2.2	ETHERY CELULÓZY .....	12
2.2.1	<i>MC – Methylcelulóza</i> .....	13
2.2.2	<i>EC – Ethylcelulóza</i> .....	13
2.2.3	<i>HEC – Hydroxyethylcelulóza</i> .....	14
2.2.4	<i>HPC – Hydroxypropylcelulóza</i> .....	14
2.2.5	<i>KMC – Karboxymethylcelulóza</i> .....	15
2.2.6	<i>HPMC – Hydroxypropylmethylcelulóza</i> .....	15
2.2.7	<i>HEMC – Hydroxyethylmethylcelulóza</i> .....	16
2.2.8	<i>Použití etherů celulózy</i> .....	16
2.3	REOLOGICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PŘI POUŽITÍ ETHERŮ CELULÓZY .....	18
2.3.1	<i>Retence vody</i> .....	18
2.3.2	<i>Účinky viskozity etherů celulózy na retenci vody</i> .....	19
2.3.3	<i>Účinky jemnosti etherů celulózy na retenci vody</i> .....	19
2.3.4	<i>Vliv provozní teploty na retenci vody</i> .....	20
2.4	Vliv etherů celulózy na hydrataci cementu.....	20
2.4.1	<i>Vliv etherů celulózy na hydrataci C<sub>3</sub>A v přítomnosti sádry</i> .....	21
2.5	Vliv etherů celulózy na rozpustnost sádry .....	21
2.5.1	<i>Rozpouštění hemihydrátu síranu vápenatého CaSO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O</i> .....	22
2.5.2	<i>Růst dihydrátu síranu vápenatého CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O</i> .....	22
2.5.3	<i>Hydratace v suspenzi hemihydrát / dihydrát síranu vápenatého</i> .....	23
2.6	Vliv etherů celulózy na malty na bázi vápna .....	23
2.6.1	<i>Vlastnosti čerstvé malty na bázi vápna</i> .....	24
2.6.2	<i>Vlastnosti ztvrdlé malty na bázi vápna</i> .....	25
<b>3</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>29</b>
3.1	POUŽITÉ SUROVINY .....	29
3.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	29
3.3	PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY .....	30
3.3.1	<i>Stanovení konzistence čerstvé malty</i> .....	30
3.3.2	<i>Stanovení objemové hmotnosti</i> .....	30
3.3.3	<i>Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku na ztvrdlých maltách</i> .....	31
3.3.4	<i>Nasákavost</i> .....	31
3.4	VÝSLEDKY A DISKUZE .....	32
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>SEZNAMY</b> .....	<b>39</b>
5.1	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	39
5.2	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A CHEMICKÝCH VZORCŮ .....	43
5.3	SEZNAM TABULEK .....	44
5.4	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	45



## 1 Úvod

Tradičně vyráběné malty jsou stále více nahrazovány suchými směsmi vyráběnými průmyslovými metodami. V důsledku toho se zvyšuje efektivita stavebních prací a odstraňují se technologické chyby, čímž se získávají vysoce kvalitní materiály. Dnes vyráběné malty jsou směsi mnoha složek, které by měly být vhodně vybrány tak, aby stavební materiál měl optimální vlastnosti.

Použití celulózy a jejích derivátů je prakticky ve všech odvětvích průmyslu velice rozsáhlé. V samotném oboru stavebních hmot je uplatnění etherů celulózy poměrně malé díky jejich vysokým cenám. Etery celulózy se používají hlavně jako modifikátory viskozity (VEA - přísady zvyšující viskozitu), modifikátory zpracovatelnosti a retenční činidla. Hrají důležitou roli v technologii suchých malt, i když jejich hmotnostní podíl je zanedbatelný. Pozornost této práce je věnována těm etherům celulózy, kterých se v praxi nejvíce používá.

Cílem této bakalářské práce je sledování vlivů různých druhů etherů celulózy na mechanické vlastnosti vápenných malt, a selekce etheru s nejvíce příznivými vlivy na pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a nasákavost malt.

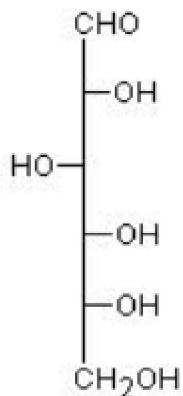
## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Celulóza

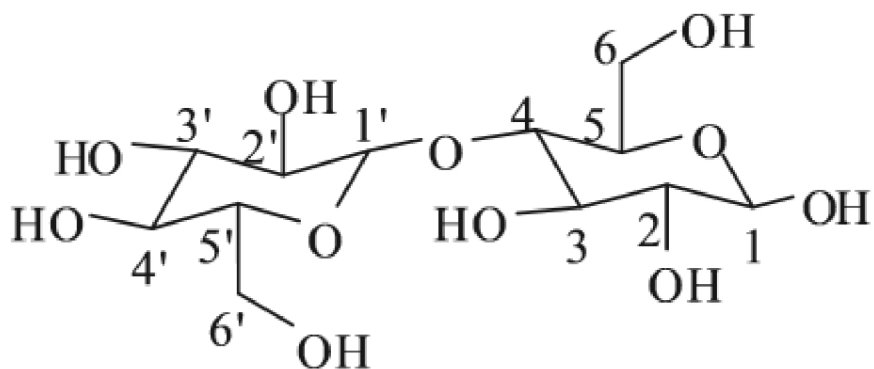
Celulóza je nejrozšířenější vysokomolekulární látkou v přírodě. Roční spotřeba činí okolo  $10^{11} - 10^{12}$  tun, jedná se tedy o velmi rozšířený materiál, který je levný, biologicky rozložitelný a obnovitelný. Celulóza je vláknitá, tvrdá a pomáhá při zachování struktury buněčných stěn rostlin. Vyskytuje se prakticky v neomezeném množství, protože tvoří asi třetinu až čtvrtinu celého rostlinného světa [1].

#### 2.1.1 Struktura celulózy

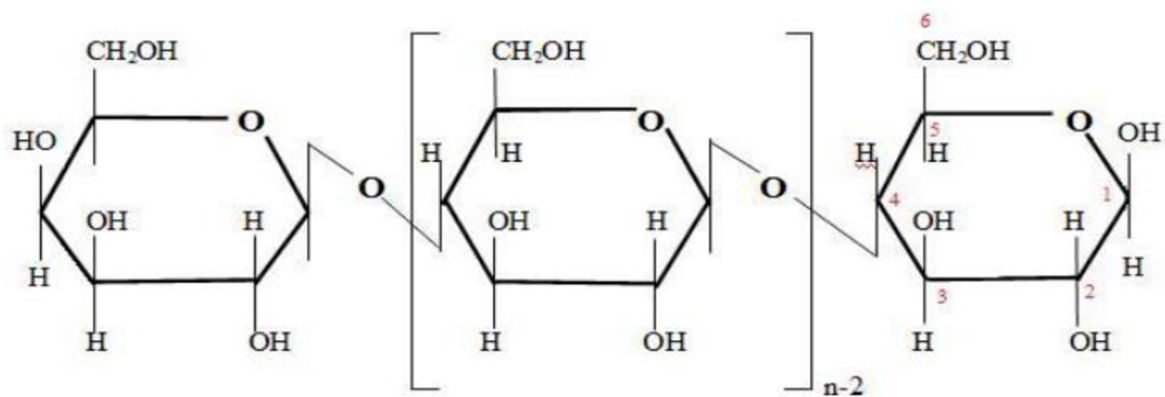
Základní stavební jednotkou celulózového řetězce je D-glukóza (obr. 1). Provede-li se však neúplná hydrolýza celulózy, získá se poměrně značné množství celobiózy. Celobióza je disacharid složený ze dvou glukózových jednotek v beta glykosidické vazbě [2]. Podobně působením acetanhydridu a kyseliny sírové na celulózu za zvýšené teploty, to je acetylací provázenou hydrolýzou, se získá oktaacetát celobiózy. Z těchto i mnoha dalších poznatků plyne, že ideální celulóza je lineární polymer složený z celobiózových článků (obr. 3) [3].



Obrázek 1: D-glukóza ve Fischerově projekci



Obrázek 2: Celobióza



Obrázek 3: Struktura celulózevého řetězce

Ve skutečnosti obsahuje celulóza poměrně velké množství jiných sloučenin, ať již ve formě příměsí, nebo přímo chemicky vázaných v molekule. Kyselá hydrolyza těchto látek probíhá mnohem snadněji než u celulózy. Příměsí jsou přitom rozpustné v loužích a některé podíly nelze již z alkalického roztoku vysrážet zpět kyselinou.

Na uvedených vlastnostech příměsí je založeno technické posuzování kvality celulózy. Vzorek celulózy se extrahuje 17,5 % hydroxidem sodným a extrakt se vysráží zpět okyselením. Nerozpustný podíl vzorku je nejkvalitnější a nazývá se  $\alpha$ -celulóza. Část, která se v louhu rozpustila a okyselením opět srazila, se označuje jako  $\beta$ -celulóza, a zbytek, který zůstal v roztoku, je  $\gamma$ -celulóza. Kvalitní technické celulózy musí obsahovat alespoň 95–96 %  $\alpha$ -celulózy [3].

### 2.1.2 Zdroje celulózy

Vzhledem k tomu, že je celulóza obsažena prakticky ve všech rostlinách, zdálo by se, že její zdroje je možno volit takřka neomezeně. Záleží ovšem na tom, v jaké formě nebo čistotě je celulóza v rostlině obsažena [3].

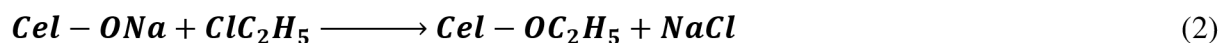
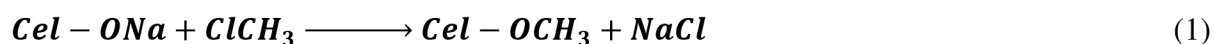
Zdrojem celulózy je hlavně dřevo a bavlna, nicméně můžeme celulózu získat z různých druhů rostlin, ale musíme počítat s tím, že množství získané celulózy bude rozdílné [1].

### 2.1.3 Chemické vlastnosti

Čistá celulóza není rozpustná v žádném rozpouštědle, není termoplastická a zahřátím na vyšší teplotu se postupně rozkládá. Oxidační činidla, jako například kyselina chlorná, chlornany, peroxidy, kyselina dusičná a další látky v koncentrované formě oxidují celulózu za vzniku tzv. oxycelulóz. Další a možná nejdůležitější reakce celulózy jsou analogické reakce alkoholů.

V alkalických roztocích celulóza botná a vzniká alkalixelulóza. Esterifikací celulózy s anorganickými i organickými kyselinami tvoří celulóza estery, většinou za přítomnosti silné minerální kyseliny, je možné esterifikovat všechny tři hydroxylové skupiny obsažené v každé glukózové jednotce celulózy.

Působením alkylačních činidel vytváří celulóza příslušné ethery. Příslušná reakce probíhá většinou v alkalickém prostředí a jako činidlo lze použít alkylhalogenidy ( $\text{ClCH}_3$  (1),  $\text{ClC}_2\text{H}_5$  (2)), alkylsulfáty nebo dialkylsulfáty [3,4].



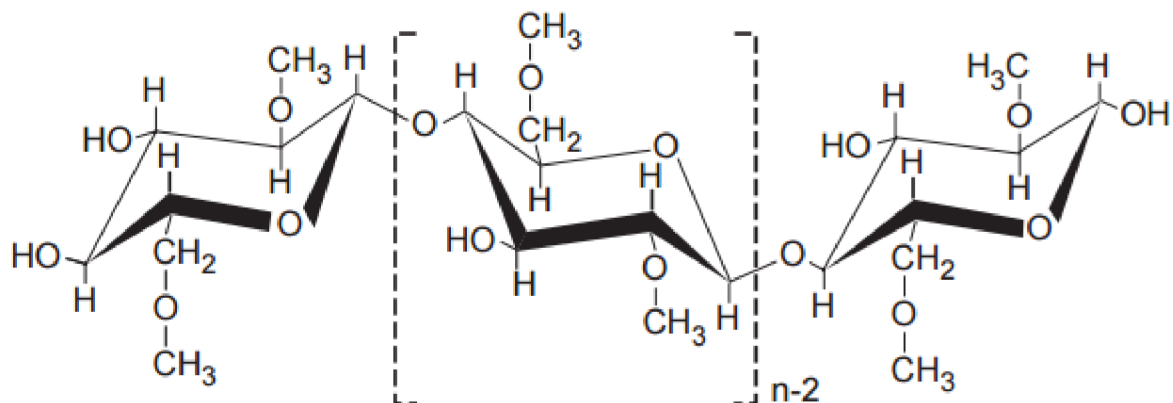
## 2.2 Ethers celulózy

Jsou vodou rozpustné polo-syntetické polymery získané z celulózy [5], které patří do široké škály činidel a zahušťovadel pro zvýšení viskozity [6]. Analogicky jako v chemii nízkomolekulárních sloučenin by ethers celulózy měly vznikat reakcí celulózy s příslušným alkoholem v prostředí silné minerální kyseliny. Reakce by musela probíhat v silně kyselém prostředí a za vysoké teploty, avšak daleko dříve než etherifikace by nastala úplná hydrolýza celulózy. Ethers se proto připravují, reakcí alkalixelulózy s alkylačním činidlem.

Chemicky jsou ethers celulózy stabilnější než estery. Etherová vazba je tak pevná, že se nehydrolyzuje ani v tak kyselém prostředí, ve kterém již dochází k úplnému rozštěpení základního řetězce makromolekuly.

Vzhledem k tomu, že jsou celulózové řetězce tvořeny silnou vodíkovou vazbou nedochází k jejich tavení či rozpouštění v běžných rozpouštědlech. Náhradou hydroxylových skupin v hlavním řetězci celulózy jinými funkčními skupinami dosáhneme rozpustnosti díky snížení krystalinity molekuly. Adicí funkčních skupin tak získáme deriváty celulózy [3].

### 2.2.1 MC – Methylcelulóza

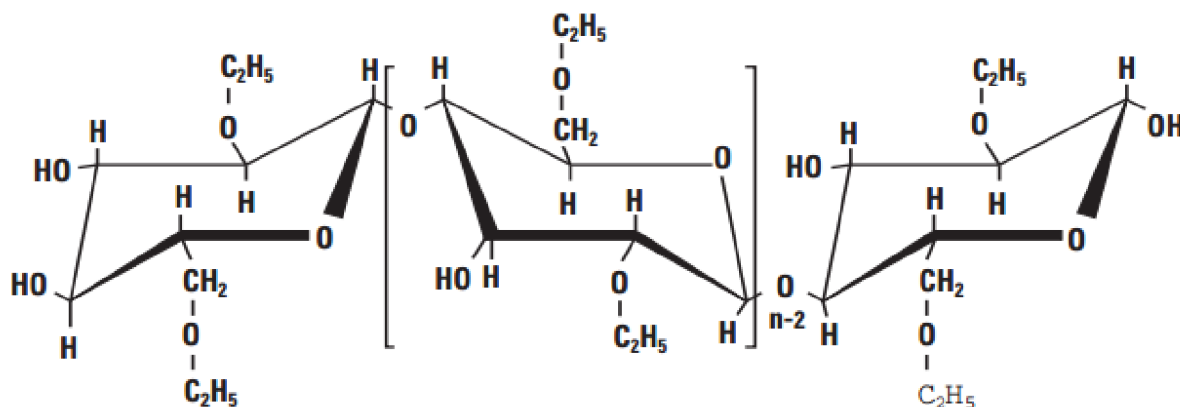


Obrázek 4: Struktura methylcelulózy

Methylcelulóza je bílý prášek, který vzniká reakcí alkaliceulózy a methylchloridu. Stupeň substituce se reguluje přebytkem methylchloridu a hydroxidu sodného. Ve studené vodě se připravená MC s nízkým stupněm substituce (1,6-2,0) rozpustí na čirý, viskózní roztok, který zahřátím začne vytvářet gel, až nakonec dojde k vyloučení methylcelulózy. Roztoky MC jsou velmi stabilní v širokém rozhraní pH (3-12). V silně kyselém nebo zásaditém prostředí dochází k jejich srážení.

Methylcelulóza s velmi nízkým stupněm substituce (0,1-0,9) již není rozpustná ve vodě, ale dobře se rozpouští v 4-10 % roztocích hydroxidů [3].

### 2.2.2 EC – Ethylcelulóza

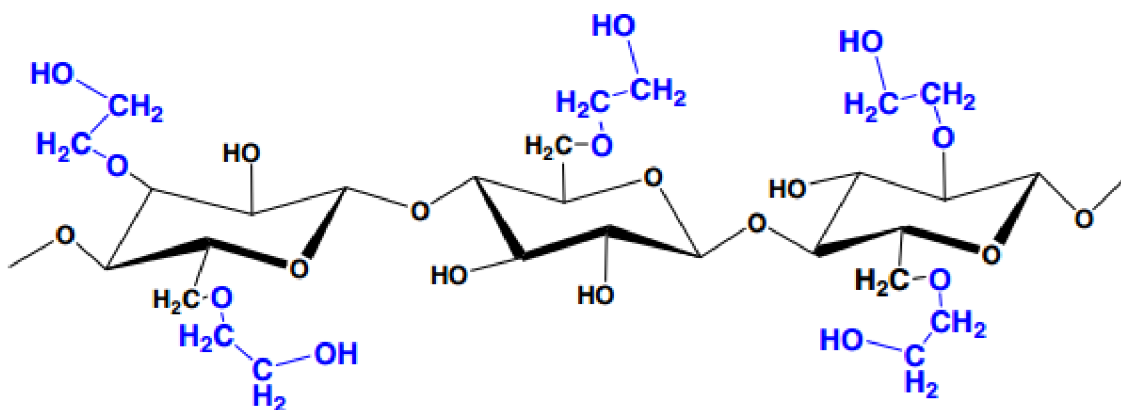


Obrázek 5: Struktura ethylcelulózy

Ethylcelulóza je bílý prášek používaný ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Vyrábí se z dřevěné buničiny nebo bavlny působením alkalického kovu a ethylace alkalické

celulózy s ethylchloridem. Ethylcelulóza se používá ve farmaceutickém průmyslu jako potahovací činidlo, aromatizační fixační prostředek, tabletové pojivo a plnivo, filmtvorné činidlo a jako činidlo zvyšující viskozitu. Ethylcelulóza se také používá v potravinářském průmyslu jako emulgátor [7,8].

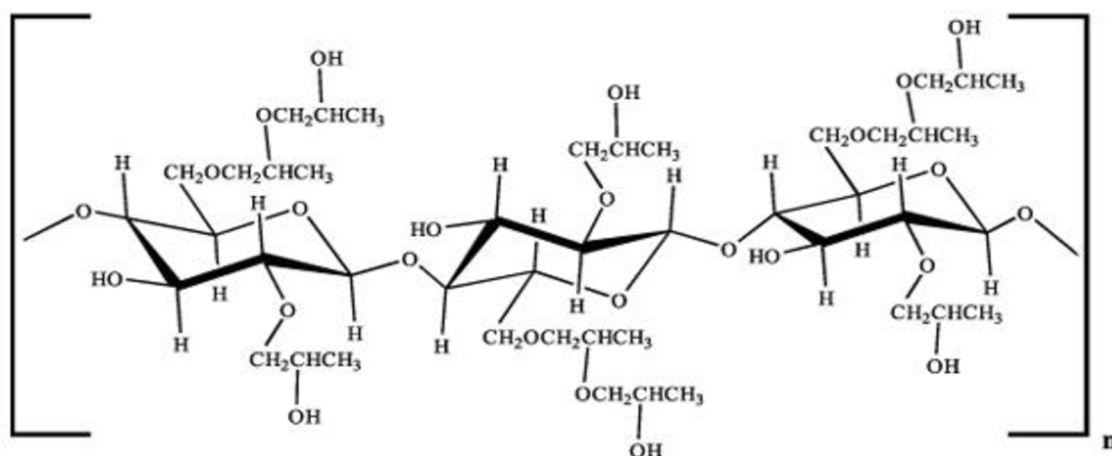
### 2.2.3 HEC – Hydroxyethylcelulóza



Obrázek 6: Struktura hydroxyethylcelulózy

Vzniká působením etylénoxidu nebo etylénchloridu na alkalické celulóze. Protože se etylénoxid neaduje jen na volné hydroxyly celulózy, ale i na hydroxyly substituentů dochází k vytváření polyethylénoxidového řetězce [3].

### 2.2.4 HPC – Hydroxypropylcelulóza

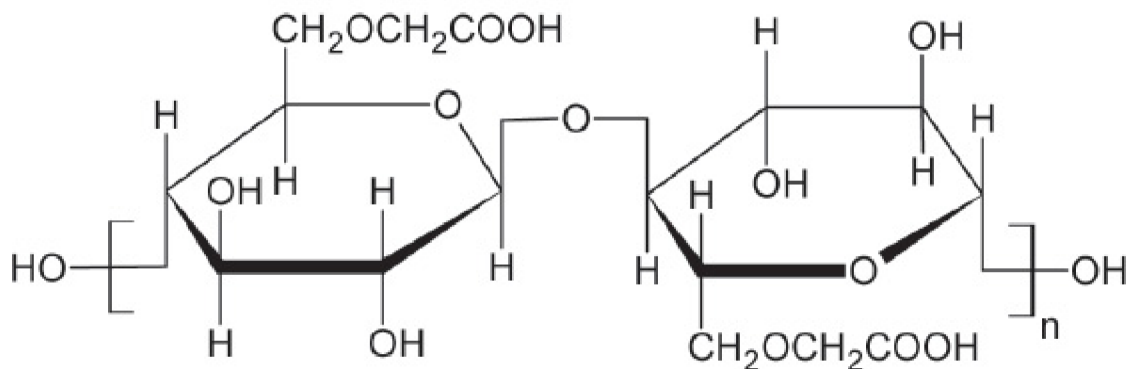


Obrázek 7: Struktura hydroxypropylcelulózy

HPC je druh důležitého neiontového etheru celulózy, který je rozpustný ve vodě, polárních organických rozpouštědlech jako je alkohol a aceton. Vodný roztok má povrchovou aktivitu,

kteřá zajišťuje stabilitu disperze, emulze a suspenze. HPC se v průmyslu používá především jako disperzní prostředek k výrobě PVC suspenzní metodou, což znamená, že produkt PVC vykazuje rovnoměrnou distribuci granulí, má dobrý plastifikační a adsorpční účinek, stejně jako vynikající zpracovatelnost. Dále se používá jako zahušťovací činidlo v olejích [9].

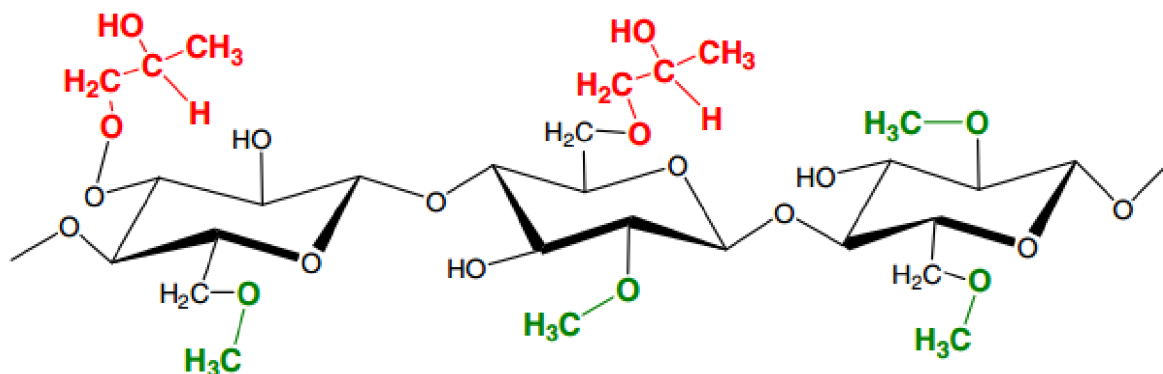
### 2.2.5 KMC – Karboxymethylcelulóza



Obrázek 8: Struktura karboxymethylcelulózy

Karboxymethylcelulóza vzniká působením chloroctanu sodného na celulózu v alkalickém prostředí hydroxidu sodného. Stupeň substituce KMC je v rozmezí (0,3-1,2) a je dobře rozpustná ve vodě a ve směsích vody s etanolem nebo acetonem, pokud obsah vody neklesne pod 60 %. Kyselinami dochází ke srážení roztoků KMC, protože sama volná kyselina je ve vodě nerozpustná [3].

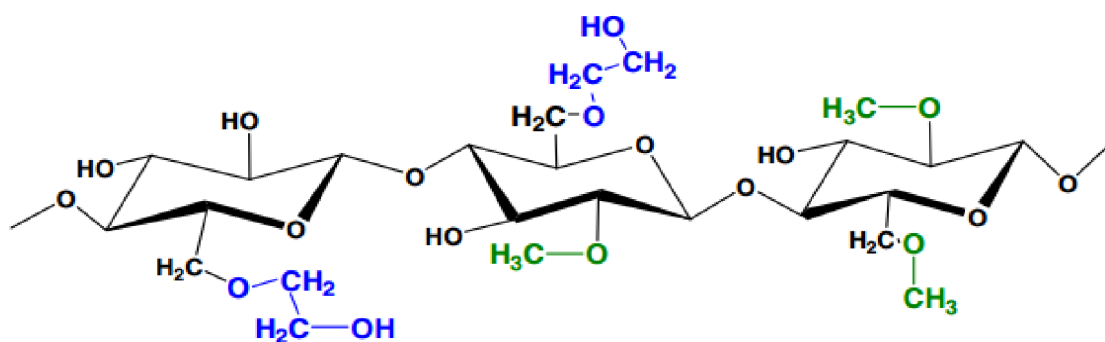
### 2.2.6 HPMC – Hydroxypropylmethylcelulóza



Obrázek 9: Struktura hydroxypropylmethylcelulózy

Jedná se o pevnou látku ve formě granulí lehce bělavé barvy. Při rozpuštění ve vodě tvoří sloučenina koloidy. Jedná se o netoxickou látku, která je hořlavá a může prudce reagovat s oxidačními činidly. HPMC na rozdíl od MC ve vodném roztoku vykazuje tepelnou vlastnost gelace. To znamená, že když se roztok ohřeje na kritickou teplotu roztok ztuhne do netekuté ale částečně pružné hmoty. Kritická teplota je nepřímo úměrná koncentraci roztoku v HPMC a koncentraci methoxy skupiny v molekule HPMC, takže čím vyšší je koncentrace methoxy skupiny, tím nižší je kritická teplota. Viskozita výsledné hmoty je přímo úměrná koncentraci methoxy skupiny. HPMC se používá především jako modifikátor reologických vlastností u stavebních materiálů [10].

### 2.2.7 HEMC – Hydroxyethylmethylcelulóza



Obrázek 10: Struktura hydroxyethylmethylcelulózy

Je neiontový ether celulózy, který má podobné vlastnosti jako jiné deriváty methylcelulózy. Vodní roztok je silně pseudoplastický a poskytuje vynikající smykovou viskozitu. HEMC se používá hlavně pro pojiva jako zahušťovadlo, stabilizátor, emulgátor. Je snadno rozpustný ve studené vodě, nikoli v horké. HEMC vykazuje vynikající výsledky ve vodních nátěrech [11].

### 2.2.8 Použití etherů celulózy

Využití derivátů celulózy je rozsáhlé v mnoha odvětvích, jako součást při výrobě kosmetiky, potravin, léků, keramiky atd. U stavebních materiálů využíváme vlastnosti, kterými ethery disponují. Tyto vlastnosti jsou například retenční schopnost, zahušťovací efekt, vlastnost tvorby filmu. Zatímco při použití v PVC průmyslu je to emulgátor a dispergační činidlo, ve farmaceutickém průmyslu jde o pojivo a matricový materiál s trvalým a řízeným uvolňováním [12].



### **2.2.8.1 Výroba latexových barev**

Ve výrobě latexových nátěrů je hojně využívána HEC střední viskozity. Hlavní role HEC v latexových barvách je zesílení, brání gelování pigmentu a pomáhá rozptýlit pigmenty a stabilizovat latex, dále může zvýšit viskozitu a přispět k lepší soudržnosti s povrchem. Doporučená dávka je obecně asi 1,5-2 ‰ [12].

### **2.2.8.2 Výroba tmelů**

Tmel vyráběný v minulých letech z konstrukčního lepidla emitoval formaldehydový plyn škodlivý pro zdraví lidí, a z tohoto důvodu je materiál postupně vyřazován. Novou alternativou materiálu jsou série produktů s použitými ethery celulózy. Vodotěsný tmel je rozdělen na dva druhy: suchý prášek a tmel. U obou druhů tmelů se obvykle používají modifikovaná methylcelulóza a hydroxypropylmethylcelulóza. Hlavní role CE v tmelu je retence vody, přilnavost, mazání atd [12].

### **2.2.8.3 Výroba betonu**

Aby bylo dosaženo maximální pevnosti, musí být beton plně zhydratován. Zvláště v letní výstavbě se z povrchu vypařuje velké množství vody, a proto jsou nutná opatření pro plnou hydrataci, je nutné beton kropit vodou. Tato metoda vede k plýtvání vodními zdroji a nepohodlí obsluhy. Klíčovým faktem je, že voda je právě na povrchu, zatímco vnitřní hydratace ještě není kompletní, takže způsob, jak tento problém vyřešit, je přidání etherů celulózy s retenčními vlastnostmi do betonové malty. Obvykle se volí hydroxypropylmethylcelulóza nebo methylcelulóza v dávkách okolo 2 % až 3 %. Retence vody může být zvýšena na více než 85 % [12].

### **2.2.8.4 Výroba sádrových a sanačních omítek**

S rychlým rozvojem stavebního průmyslu jsou vyšší nároky na nové stavební materiály. Díky zvýšení povědomí lidí o ochraně životního prostředí a neustálém zlepšování efektivnosti výstavby došlo k rychlému rozvoji cementových materiálů a sádrových výrobků. Nyní jsou nejčastějšími produkty sádrové omítky. Sádrová omítka je druh kvalitního omítacího materiálu pro vnitřní stěny a stropy. Problémem sádrových materiálů jsou duté praskliny, které lze eliminovat přidávkem CE s retardérem. V tomto ohledu se nejčastěji volí hydroxypropylmethylcelulóza v dávkách okolo 1,5 % až 2 %. Při tomto způsobu se však samotný CE nechová jako zpomalovač, a proto je nutné použít směs s retardérem kyseliny citronové, tato směs neovlivní počáteční pevnost [12].

### **2.2.8.5 Výroba izolačních malt**

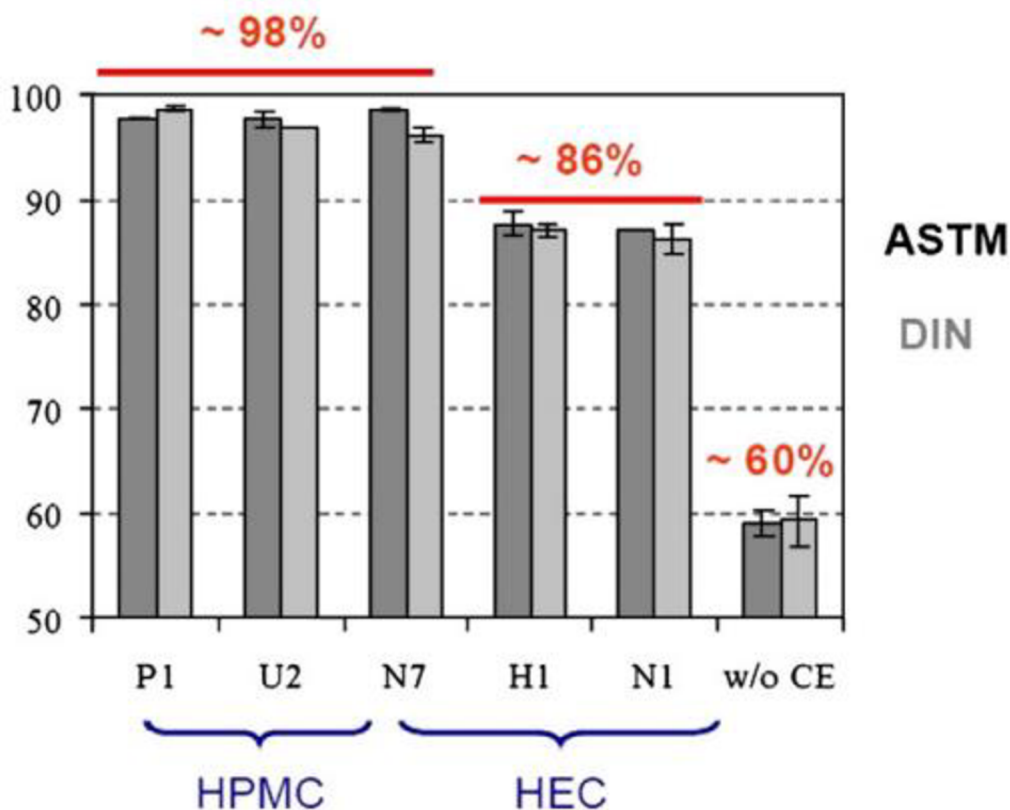
Izolační malta je poměrně nový stavební materiál. Jedná se o druh stěnového materiálu složeného z izolačního materiálu a pojiva. V tomto materiálu hraje celulóza klíčovou úlohu, vede ke zlepšení spojení mezi pojivem a plnivem a zvýšení pevnosti materiálu. Obecně se volí methylcelulóza s vysokou viskozitou v dávkách okolo 2 ‰ až 3 ‰ [12].

## **2.3 Reologické vlastnosti materiálů při použití etherů celulózy**

Pokud jde o reologické chování, malty se obvykle chovají jako binghamské kapaliny. Binghamské chování je charakterizováno tzv. prahovým smykovým napětím (mezi toku), což znamená, že k přetváření kaše dochází až po překročení jisté prahové velikosti působení vnějších sil. V klidu vznikají mezi částicemi suspenze fyzikální vazby (elektrické, van der Waalsovy aj.). Tyto vazby jsou při pohybu kapaliny působením vnějších sil rozrušovány. Ponecháním v klidu dochází opět k agregaci částic a vytváření koloidního gelu, bránícího (do určité míry) deformaci kaše – po ukončení působení vnějších sil si kapalina drží svůj tvar. Tato vlastnost se v praxi nazývá plasticita a umožňuje mj. i nanášení malty na svislé plochy a stropy, aniž by malta po nanesení стекла. Tloušťka vrstvy malty musí být ovšem taková, aby vnitřní napětí způsobené tíhou malty nepřekročilo zmíněné prahové smykové napětí. Tvorbu gelu lze podpořit gelotvornými přísadami na bázi bílkovin nebo koloidními přísadami rostlinných polysacharidů. Reologické chování se zkoumá za pomoci reometrů a viskozimetrů, které jsou schopné určit základní reologické parametry studovaných materiálů [13,46].

### **2.3.1 Retence vody**

Retence vody je vlastnost malty, která brání rapidní ztrátě vody do zdících prvků vlivem sání, dále zabraňuje krvácení nebo vodnímu zisku, když je malta v kontaktu s relativně nepropustným podkladem. Retence vody je důležitou vlastností malty, protože ovlivňuje funkčnost a spojení mezi maltou a zdícím prvkem. Retence je ovlivněna skladbou malty a může být zvýšena použitím organických přísad. Etery celulózy jsou přísady s nevhodnějšími molekulami pro zlepšení retence vody a její zpracovatelnosti díky zpožděné hydrataci [14].



Obrázek 11: Retenční schopnost u čerstvé malty smíchané s různými typy CE, korelace mezi metodami ASTM a DIN.

Označením P1, U2, N7, H1 a N1 se dané CE liší v molekulové hmotnosti [6].

### 2.3.2 Účinky viskozity etherů celulózy na retenci vody

Obecně platí, že čím vyšší bude viskozita, tím lepší budou retenční účinky. Nicméně, čím vyšší je viskozita, tím vyšší je molekulová hmotnost etheru, tím pádem dojde ke snížení rozpustnosti, což má negativní vliv na pevnost malty. Vysoká viskozita je u malt ve stavebnictví žádaná, protože má za následek vyšší stupeň lepivosti, a tím pádem lepší přilnavost k povrchu. Naproti tomu některé ethery o střední nebo nízké viskozitě po modifikaci dosahují vynikajících výsledků v konstrukčních pevnostech [14].

### 2.3.3 Účinky jemnosti etherů celulózy na retenci vody

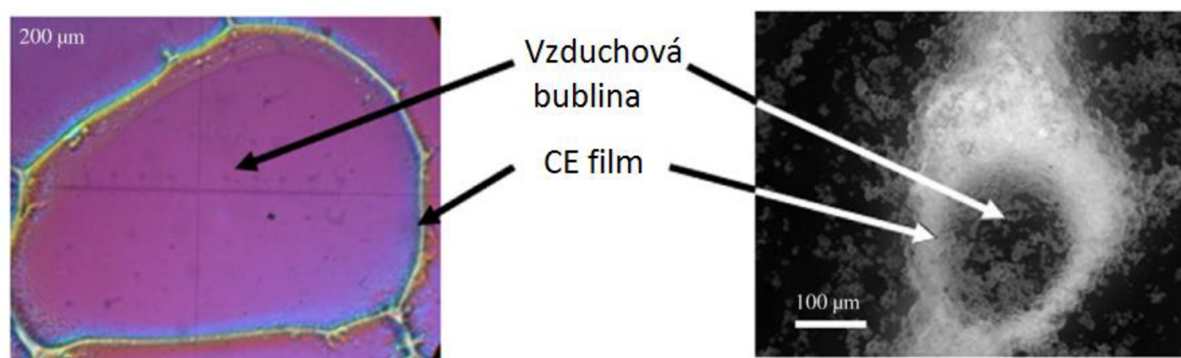
Čím jemnější ethery máme, tím lepší schopnosti retence vody získáme. Jemnost má určitý vliv na rozpustnost etherů. Hrubší ether je obvykle zrnitý, snadno disperguje a rozpouští se ve vodě, aniž by docházelo ke shlukování, ale rychlost rozpouštění je velmi pomalá. Hrubší ether není vhodný pro suchý způsob mísení malty. V suché směsi se ethery rozptýlí mezi pojivo a zrna kameniva; dojde-li k shlukování při rozpouštění ve vodě, opětovné dispergování je velice obtížné. Hrubší ethery mohou snížit rychlost vytvrzování a s tím spojené výskyty trhlin v důsledku rozdílů ve vytvrzování [14].

### 2.3.4 Vliv provozní teploty na retenci vody

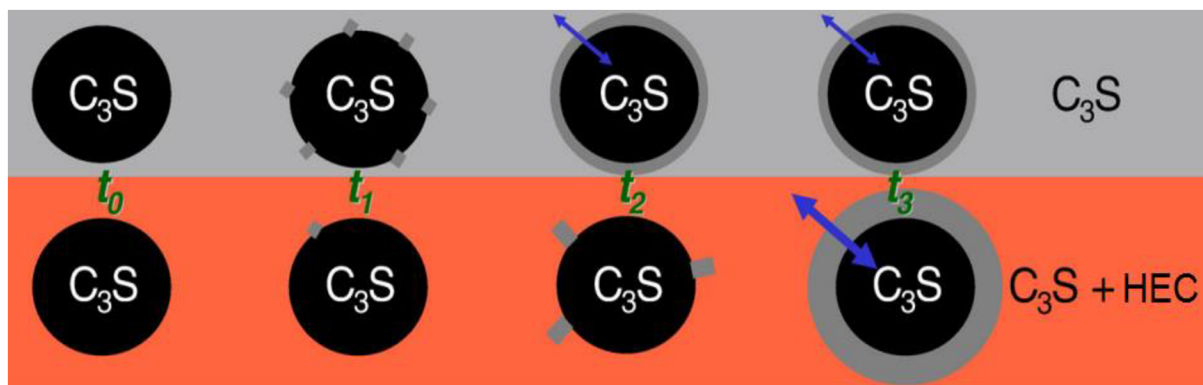
V praxi se většinou výstavba provádí v letním období, co má za následek vyšší venkovní teplotu. Při nanášení vnější omítky při zvýšené teplotě dochází k urychlení tvrdnutí malty. Pokud by došlo k poklesu retence vody vlivem teploty, bude to mít negativní vliv na zpracovatelnost a odolnost proti vzniku trhlin. V tomto případě je snížení teplotního faktoru velice důležité. Výsledky testů ukázaly, že zvýšením stupně etherifikace u etherů celulózy má příznivý vliv na retenci vody i při vyšších teplotách [14].

### 2.4 Vliv etherů celulózy na hydrataci cementu

Ethery celulózy jako významné zahušťovadlo a činidlo snižující obsah vzduchu, upravují zpracovatelnost čerstvých cementových směsí na požadovanou úroveň. Ethery celulózy dosahují vysoké retenční kapacity zabraňující rychlému nasáknutí vody z čerstvé směsi do podkladu, čímž dochází ke zlepšení vlastností směsi. Přídavek etheru celulózy ovšem může na druhou stranu vyvolat nekontrolované a problematické zpomalení hydratace cementu. Současné znalosti z molekulové skladby etherů celulózy již umožňují poměrně přesně předpovídat kinetiku hydratace cementových směsí obsahujících CE. Pourchez J. a kol. [15] sledovali vliv CE na nukleaci C–S–H fáze a tvorbu portlanditu při hydrataci  $C_3S$ . Dosavadní studie ukazují, že dochází k adsorpci polysacharidu na povrchu slínekových minerálů. Obecně se předpokládá, že polysacharidy reagují s hydroxidy kovů, které jsou ukotveny na povrchu těchto minerálů. Co se trvanlivosti CE v polymercementovém kompozitu týče, bylo prokázáno, že ethery celulózy jsou stabilní v zásaditém prostředí a nevykazují degradaci [16].



Obrázek 12: Příklady CE filmů na rozhraní vzduchových dutin. Pozorování cementové směsi polarizační světelnou mikroskopií (vlevo). Zkoumání prostorového rozložení (vpravo) [6].



Obrázek 13: Schematický přehled dopadu tloušťky a propustnosti pláště C-S-H během hydratace  $C_3S$  [15].

#### 2.4.1 Vliv etherů celulózy na hydrataci $C_3A$ v přítomnosti sádry

Výrazné zpomalení hydratace  $C_3A$  vlivem přítomnosti CE bylo pozorováno ve zředěném médiu. Konkrétně molekuly CE s velmi nízkou molekulovou hmotností umožňují silné zpoždění hydratace  $C_3A$ . Výsledky poukazují na to, že zpoždění způsobené CE nelze vysvětlit pomocí předpokladu iontového bránění pohybu molekul a prokázaly, že adsorpce CE je fázově specifická. Ve skutečnosti je důležitá adsorpce CE na sádrovec, zatímco významná adsorpce na ettringitu nebyla zaznamenána. Druh použitého CE má velký vliv na adsorpci u hydratovaných hlinitanů vápenatých (CAH), protože adsorpce HEC na tuto fázi je alespoň 4krát vyšší než adsorpce HPMC. Přídavek CE vede také k postupnému zpomalení hydratace  $C_3A$  v závislosti na druhu CE; HEC způsobuje vyšší zpoždění než HPMC.

Na základě těchto pozorování se zdá být substituční skupina (druh a obsah) CE důležitější pro hydrataci  $C_3A$  než molekulová hmotnost CE. Bez použití síranu vápenatého bylo dokázáno, že CE můžou snížit jak rozpouštění  $C_3A$ , tak srážení hydratovaných hlinitanů vápenatých. Zdá se, že čím vyšší je adsorpce CE na  $C_3A$ , tím silnější je zpomalení srážení CAH. Bez ohledu na přidané množství sádry, CE zpomalují rozpouštění  $C_3A$ , srážení ettringitu, a pak silně snižují srážení CAH [17].

#### 2.5 Vliv etherů celulózy na rozpustnost sádry

Zpomalovací účinky CE na sádrovce lze vysvětlit na základě standardních reakčních rychlostí. Tyto údaje umožňují kvantifikovat efekt CE v různých fázích procesu hydratace sádry. Rozpuštění hemihydrátu síranu vápenatého (HH), nukleace dihydrátu síranu vápenatého (DH) a růst krystalů DH při vysokých stupních přesycení jsou procesy řízené difúzí. Jejich reakční kinetika je zpomalena díky zvýšené viskozitě roztoku s CE a výslednými difúzními vlastnostmi roztoku [18].

### 2.5.1 Rozpouštění hemihydrátu síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ )

Rychlost rozpouštění HH závisí na různých faktorech, jako například obsah rozpustného  $\text{CaSO}_4$ , reaktivní povrchová plocha, koncentrace  $\text{CaSO}_4$  v tekuté fázi a rychlost míchání. Je důležité oddělit tyto proměnné, abychom byly schopni identifikovat vliv přísad na bázi CE. Pozorovaná rychlost rozpouštění pomocí BET v deionizované vodě silně závisí na počáteční koncentraci HH. To se mění s největším poměrem rychlosti při počáteční koncentraci HH 50 g/l. Bylo zjištěno, že rychlost rozpouštění klesá exponenciálně s rostoucí koncentrací HH. Navíc rychlost rozpouštění závisí také na koncentraci rozpuštěných iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ . Vzhledem k samovolné homogenní nukleaci DH při vyšších koncentracích  $\text{CaSO}_4$  není možné pozorovat rychlost rozpouštění HH při koncentraci  $\text{CaSO}_4$  vyšší než 44 mmol/l. Mezi další faktory ovlivňující rozpouštění patří morfologie částic HH a množství agregátů HH. Za přítomnosti CE je rozpouštění HH zpomaleno v závislosti na koncentraci CE. Přidání CE do tekutiny zvyšuje viskozitu roztoku exponenciálně, proto by vyšší aktivační energie v přítomnosti CE mohla být vysvětlena pomalejší difúzí v tekutině obsahující CE. Ve skutečnosti rychlost rozpouštění koreluje nepřímo s viskozitou různých typů CE. Neexistuje známka silné inhibice interakce mezi CE a HH povrchem, což by znamenalo, že reakce rozpouštění by byla řízena povrchovou reakcí [19].

### 2.5.2 Růst dihydrátu síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Růst DH v čistém roztoku  $\text{CaSO}_4$  se zvyšuje díky zvyšujícímu se přesycení [20]. Výsledky růstu DH v roztoku bez CE potvrzují dřívější výsledky a to, že při vyšších stupních přesycení ( $S > 1:4$ ) se objemová difuze stává stupněm regulace rychlosti růstu DH [21]. Pod hodnotou koncentrace CE 0,075 hmotnostních % se zdá, že rychlost růstu DH je téměř neovlivněna přítomností CE. Přes koncentraci CE 0,075 hmotnostních % je rychlost růstu DH snížena až o 80 %; zpomalení závisí na stupni přesycení. Zpomalovací účinek je nezávislý na koncentraci CE v rozmezí od 0,075 do 0,20 % hmotnostních.

Experimenty v  $S = 1:25$  a koncentraci CE 0,15 % hmotnostních vykazují růst řízený povrchovou reakcí. Morfologie krystalů rostoucích z vodného roztoku svědčí o přítomnosti určitých aditiv nebo nečistot, které ovlivňují růst krystalů. Je známo, že aditiva na bázi kyseliny fosforité inhibují růst DH účinně i v přítomnosti stopových množství [22]. Vzhledem ke specifickým interakcím mezi těmito molekulami kyseliny fosforité a určitými místy na povrchu krystalu DH [23] je makroskopická morfologie odlišná ve srovnání s krystaly DH vyrostlými z čistého roztoku  $\text{CaSO}_4$  [19]. Nicméně nebyl nalezen žádný morfologický rozdíl mezi krystaly DH rostoucích v roztoku CE a roztokem bez CE v identických stupních

přesycení. Po nárůstu hmotnosti přibližně o 20 % (po 45 minutách přesycení) nedošlo k žádným morfologickým rozdílům mezi krystaly DH rostoucími v roztoku s CE o obsahu 0,15 % a roztokem bez obsahu CE, i když kinetické studie jasně ukazují, že rychlost růstu byla zpomalena o více než 80 % za přítomnosti CE.

### **2.5.3 Hydratace v suspenzi hemihydrát / dihydrát síranu vápenatého**

Vytvoření sádry zahrnuje rozpouštění HH a srážení DH (nukleace a růst). Doba tuhnutí a mechanické vlastnosti sádrové omítky závisejí v konečném důsledku na reakčních rychlostech přispívajících reakčních mechanismů (rozpuštění, nukleace, růst) [24]. Oddělení rozpouštění HH a růstu DH poskytuje podrobný pohled na efekt CE, výsledky však nejsou získány za reálných podmínek. Aby byl sledován efekt CE za reálnějších podmínek, bylo studováno tekuté složení suspenze s původně 50 g/l HH. Tento postup byl použit v předchozích studiích a bylo zjištěno, že poskytuje informace o různých stupních transformace HH-DH, včetně rozpouštění HH, nukleace DH a následného růstu DH [24,25,26]. V přítomnosti 0,25 hmotnostních procent CE je dosaženo stejné reakční rychlosti mnohem později ve srovnání s roztokem bez obsahu CE, což je důsledkem zpomaleného rozpouštění HH stejně jako zpomalování nukleace a růstu DH.

## **2.6 Vliv etherů celulózy na malty na bázi vápna**

Přísady zvyšující viskozitu a retenci vody jsou velmi běžné v oblasti cementových malt. Doposud však není zcela známo, jak se tyto produkty chovají v maltách na bázi vápna. Autoři v článku [27] studovali vliv tří různých přísad na reologické chování vápenných malt. Uvedli, že retenční činidla se obvykle používají ke zvýšení viskozity malty, což vede k vytvrzenému produktu, který má lepší homogenitu.

Rekonstrukční práce na budovách vyžadují použití podobných materiálů, jako jsou původně použité, přičemž pro tento účel jsou nejvhodnější volbou malty na bázi vápna [28]. Přestože malty na bázi vápna mají několik výhod a jsou kompatibilnější než cementové malty [29], přetrvávají některé nevýhody, jako například: dlouhá doba tuhnutí, poměrně nízká mechanická pevnost, vysoká kapacita absorpce vody kapilaritou, velké objemové změny v důsledku smrštění [27]. Je třeba si uvědomit, že vzdušné vápenné malty vytvrzují dvěma mechanismy: ztrátou přebytku vody a následným zhutněním materiálu, procesem karbonatace.

Přidání retenčních činidel k nehydraulickým pojivům může být do jisté míry škodlivé, protože pokud je množství záměsové vody větší, nebo je voda zadržována v průběhu času, přebytek

vody by mohl zabránit přístupu CO<sub>2</sub> do malty, čímž zpomalí proces karbonatace [30,31]. Ztížení difuze oxidu uhličitého ze vzduchu do malty může mít za následek pomalejší růst krystalů uhličitanu vápenatého, avšak v konečné fázi mohou být tyto krystaly větší velikosti než bez použití přísady. To se může příznivě projevit pevnější vazbou pojiva s plnivem i s jednotlivými částicemi pojiva mezi sebou.

## **2.6.1 Vlastnosti čerstvé malty na bázi vápna**

### **2.6.1.1 Konzistence**

Pro dosažení stejných konzistencí mezi referenčním vzorkem a vzorky s přísadami CE bylo nutné přidat vždy vyšší množství vody, zejména u vzorku s HPMC (cca o 22 % více než u referenční malty). Tyto výsledky bylo možné pozorovat ve více studiích [27].

### **2.6.1.2 Hustota**

V porovnání s referenční směsí byl pozorován pokles o 5,1 % u vzorků s HPMC a u GG (guarová guma) o 3,8 % v hustotě čerstvých směsí. Čím více vody bylo přidáno, tím nižší byla dosažená hustota. Tyto výsledky odpovídají záznamům Paiva a kol. [32] a Seabra a kol. [27], kteří uvádějí, že přidání HPMC k cementovým a vápenným maltám vede ke snížení hustoty v čerstvém stavu.

### **2.6.1.3 Obsah vzduchu**

Přidání přísad vede ke zvýšení obsahu vzduchu, u HPMC bylo zaznamenáno zvýšení o 3,4 % zatímco u GG o 5,0 %. Zvýšení obsahu vzduchu vysvětluje chemické složení přísad. Přísady jako HPMC nebo guarová guma mají přirozené povrchově aktivní vlastnosti, které snižují povrchové napětí pasty, což vede ke stlačování vzduchu [33]. Předchozí studie na cementových [32,16,34] a vápenných maltách [27] ukázaly, že činidla zadržující vodu na bázi etherů celulózy zachycují velké množství vzduchu. Tento obsah vzduchu by mohl zvýšit odolnost materiálu před zmrazovacím a rozmrazovacím cyklem [36].

### **2.6.1.4 Doba tuhnutí**

Mechanismus tuhnutí malt s použitím vzdušného vápna jako pojiva je popsán procesem karbonatace, kdy přebytek záměsové vody nebo retenční schopnost přísady může být škodlivá. Výsledky ukázaly, že při přidání některé z přísad dochází ke zpomalení tuhnutí. Vliv přísad na proces karbonatace byl zjištěn pomocí TG analýzy, kde se stanovilo množství volné vody, Ca(OH)<sub>2</sub> a CaCO<sub>3</sub>. Přebytek záměsové vody ve vzorku s HPMC zůstal po 7



dnech, což zjevně bránilo karbonatáci (18,72 %  $\text{Ca(OH)}_2$ ). Vliv záměsové vody ve vzorcích s GG byl po 7 dnech menší (nižší množství  $\text{Ca(OH)}_2$  - 14,15 % - a většího množství  $\text{CaCO}_3$  - 80,68 %). Po 28 dnech byly zjištěny pouze malé rozdíly v karbonatáci a v množství volné vody. Po 91 dnech nebyly zjištěny žádné významné rozdíly.

Vývoj karbonatace ukazuje, že přebytek vody a retenční schopnost přísad měly vliv na dobu tuhnutí čerstvých směsí. Zpoždění doby tuhnutí je nevýhodou pro použití přísad u vápenných malt [36].

## **2.6.2 Vlastnosti ztvrdlé malty na bázi vápna**

### **2.6.2.1 Hustota**

Výsledky kterékoli z testovaných malt vedli ke snížení hustoty materiálu v závislosti na čase. Toto snížení hustoty může být způsobeno přebytkem záměsové vody, což vede ke zvýšení počtu pórů [37].

### **2.6.2.2 Objemové změny – smrštění**

Smrštění malt s přísadami bylo vyšší než u malty referenční (13,59 mm/m pro referenční maltu, zatímco u vzorků HPMC a GG bylo určeno 26,77 mm/m a 16,35 mm/m). Vysoké smršťovací koeficienty mohou být také připisovány velkému množství záměsové vody. V souladu s hodnotami přebytku záměsové vody vykazovala HPMC malta nejvyšší hodnoty smrštění [36].

### **2.6.2.3 Kapacita absorpce vody kapilaritou**

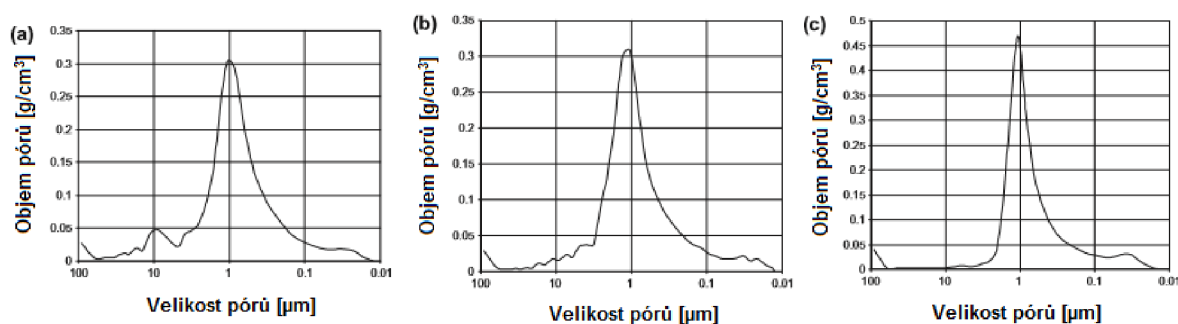
Absorpce vody je důležitá vlastnost malt, protože jsou obvykle vystaveny environmentálním jevům (dešti) nebo jsou v kontaktu s prvky, které mohou být mokré (půda). Pokud malta absorbuje vodu snadno, bude poškozena a pohyb vody uvnitř struktury budovy ovlivní a poškodí jiné materiály, jako je plnivo, skrze výskyt výkvětů [38]. V této studii výsledky pro maltu s HPMC prokázaly vyšší absorpci vody než referenční vzorek. Na rozdíl od toho u malty s GG autoři dosahovali lepších výsledků. Pokud jde o tuto vlastnost, Paiva a kol. [39] uvádějí, že přísady s retenční schopností snižují kapilární nasákavost v cementových maltách a souvisí s tímto chováním skutečnost, že tyto přísady zachycují vzduch, a tak vznikají velké póry, které mohou narušit kapilární síť.

#### 2.6.2.4 Propustnost vodních par

Propustnost vodních par je další důležitou vlastností, která zabraňuje poškození způsobenému vlhkostí. Malty musí mít značnou propustnost aby vodní pára mohla procházet z vnitřní části budovy směrem ven. Zadržení vody může být příčinou výkvětů a souvisejících problémů [29,40]. Koeficient propustnosti vyjadřuje obtíže, které molekuly vodní páry mají při pokusu o průchod maltou. Nízký koeficient znamená vysokou propustnost. Jak GG tak HPMC zvyšují propustnost vodních par [36].

#### 2.6.2.5 Struktura pórů

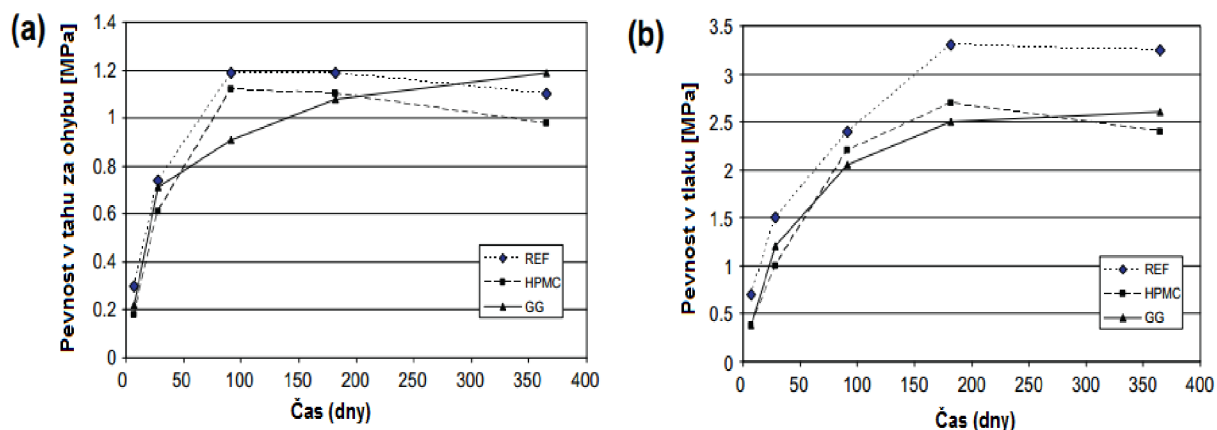
Jak malta referenční tak malty s přísadami vykazovaly hojný výskyt pórů o průměru 1  $\mu\text{m}$ , což bylo v souladu s předchozí prací na vápenných maltách [38,41,42]. Přidání GG vedlo k drastickému snížení podílu malých pórů a vytvoření větších pórů (průměry od 100  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ ). Rozložení pórů s nižší porozitou může také vysvětlit snížení absorpce vody kvůli vysokému obsahu vzduchu, vzduchové bubliny by mohly přerušit kapilární síť. Malta s HPMC obsahovala nižší procento velkých pórů o průměru 100  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$  než malta s GG [36].



Obrázek 14: Výsledky rtuťové pórozimetrie pro zkoumané malty: a) REF malta, b) malta s HPMC, c) malta s GG

#### 2.6.2.6 Mechanické vlastnosti

Přidání přísad mělo negativní vliv na pevnosti v tlaku. Negativní vlivy mohou být způsobeny přebytkem záměsové vody a vodoretenci schopností přísad. Větší otevřená pórovitost u modifikovaných malt má také tendenci podporovat nižší pevnosti [36].



Obrázek 15: Výsledky mechanických pevností malt s HPMC a GG a) pevnosti v tahu za ohybu, b) pevnosti v tlaku

### 2.6.2.7 Mrazuvzdornost

Hmotnostní změny malt poté, co byly vystaveny několika cyklům zmrazování a rozmrazování byly silně závislé na hodnotách otevřené pórovitosti. Čím větší byla otevřená pórovitost malt, tím vyšší byla absorpce vody, a tím vyšší byl i úbytek hmotnosti [36].

	1 Cyklus		4 Cyklus		7 Cyklus		10 Cyklus		14 Cyklus	
	AD	WC	AD	WC	AD	WC	AD	WC	AD	WC
REF	0	+17.6	4	+18.5	-	-	-	-	-	-
HPMC	0-1	+23.3	1-2	+27.8	5	-	-	-	-	-
GG	0	+21.1	2-3	+17.8	4-5	+23.7	-	-	-	-

Obrázek 16: Výsledky cyklického zmrazování a rozmrazování malt s HPMC a GG

AD: Změna stupně

Pozorované změny:

0: Bez změny

1: Mírně změněné, s malými (tenkými a krátkými) prasklinami na povrchu vzorků

2: Viditelné pavučiny a hlubší praskliny

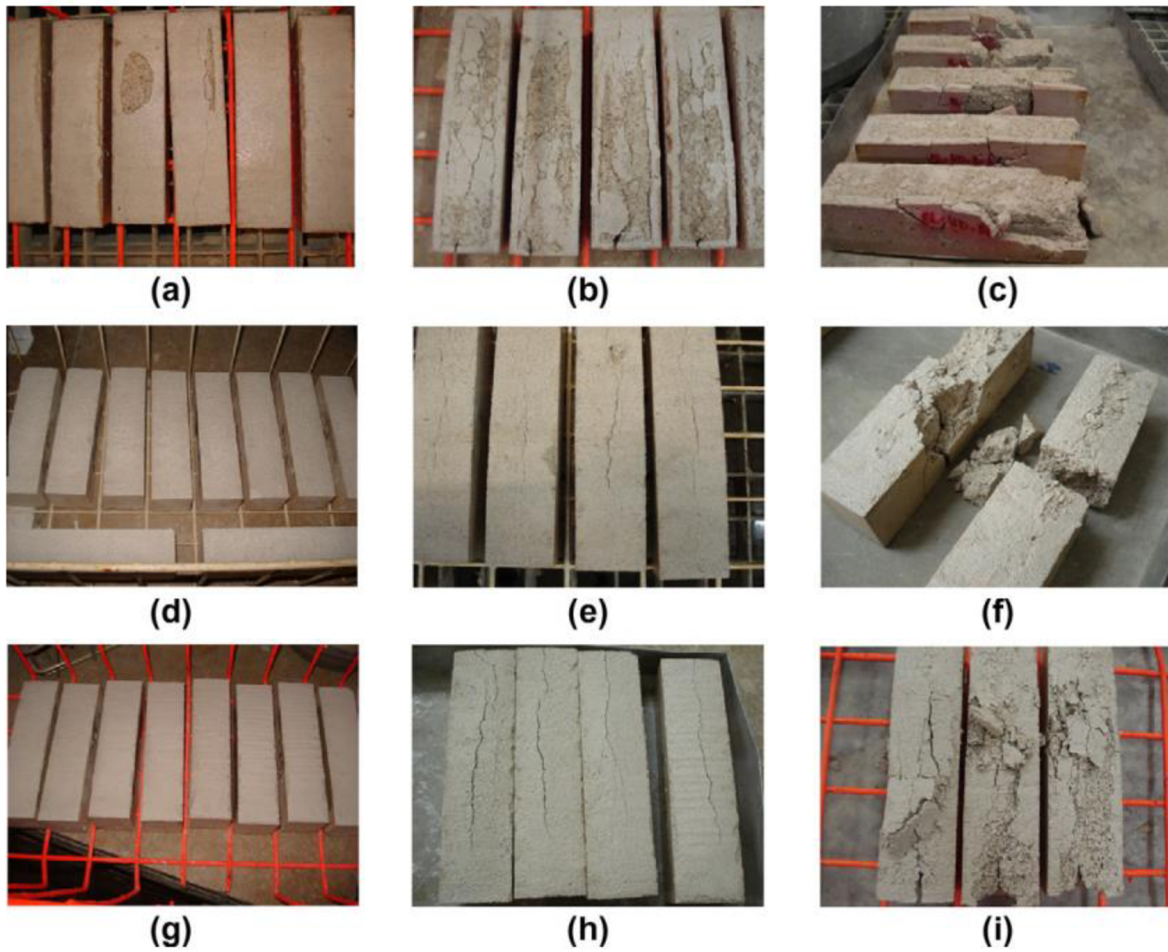
3: Velmi změněné, s několika hlubokými prasklinami

4: Vysoký stupeň změny s velkými a hlubokými prasklinami včetně částečného úbytku hmotnosti

5: Úplně změněno. Vzorek je prakticky zničen, pouze malé části jsou neporušené.

WC: Změna hmotnosti

–: Neurčeno, protože vzorky byly zcela zničeny



Obrázek 17 Výsledky cyklického zmrazování a rozmrazování a) vzorky REF po 1 cyklu, b) vzorky REF po čtyřech cyklech, c) vzorky REF po 6 cyklech, d) vzorky HPMC po 1 cyklu, e) vzorky HPMC po 4 cyklech, f) vzorky HPMC po 7 cyklech, g) vzorky GG po 1 cyklu, h) vzorky GG po 4 cyklech, i) vzorky GG po 8 cyklech

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části bylo zhotovení vápenných malt s použitím různých druhů etherů celulózy a porovnání jejich výsledných mechanických vlastností. U čerstvých malt bylo pozorováno jak množství a druh etheru ovlivňuje konzistenci pomocí výsledného rozlití na střešacím stolku. Z tohoto důvodu bylo množství použité záměsové vody u všech vzorků stejné. U ztvrdlých malt byla stanovena pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 7 a 28 dnech a nasákavost po 28 dnech.

#### 3.1 Použité suroviny

Na výrobu vzorků vápenných malt byl použit vápenný hydrát CL 90 S od firmy Carmeuse s.r.o. Mokrá, dále čistý normový křemenný písek PG 1 o granulometrii do 0,5 mm od firmy Filtrační písky s.r.o. z Chlumu u Doks a různé druhy etherů celulózy. Jako záměsová voda byla použita pitná voda z vodovodního řadu.

Tabulka 1 - Vlastnosti použitých etherů celulózy

Druh CE	Barva	Forma	Viskozita ve vodném roztoku [mPa·s]
MC	Bílá	Jemný prášek	20 ~ 30
HEC			2600 ~ 3400
HEMC			15000 ~ 20500
HPMC			12000 ~ 18000
KMC			5 ~ 15

#### 3.2 Příprava vzorků

Na přípravu čerstvé směsi byla nejprve připravena suchá směs s poměrem pojivo/písek 1 : 1 objemově a přidán ether celulózy, po důkladné homogenizaci bylo přidáno odměřené množství vody. Míchání směsi bylo provedeno v laboratorní míchačce po dobu 1 minuty. Směs byla uložena do forem na výrobu zkušebních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm dle normy ČSN EN 1015-2 [43]. Po 4 dnech byla tělesa odformovaná a uložena v laboratoři. Po 7 a 28 dnech byly odebrány vždy 3 vzorky od každé směsi a stanoveny mechanické vlastnosti.

Tabulka 2 - Receptury vzorků

Suroviny	Množství		
	[g]		
Ca(OH) <sub>2</sub> CL 90	100		
Písek PG I	305		
Voda	140		
Celulóзовý ether	0,1	0,5	1
Methylcelulóza	MC 1	MC 5	MC 10
Hydroxyethylcelulóza	HEC 1	HEC 5	HEC 10
Hydroxyethylmethylcelulóza	HEMC 1	HEMC 5	HEMC 10
Hydroxypropylmethylcelulóza	HPMC 1	HPMC 5	HPMC 10
Karboxymethylcelulóza	KMC 1	KMC 5	KMC 10

### 3.3 Prováděné zkoušky

#### 3.3.1 Stanovení konzistence čerstvé malty

Stanovení konzistence čerstvé malty bylo provedeno podle normy ČSN EN 1015-3 [44] za použití střešovacího stolku. Pomocí této zkoušky byla zjištěna konzistence čerstvé malty tak, že se změřil průměr koláče ve dvou na sebe kolmých směrech s přesností na 1 mm. Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 s porovnáním na obr. 16.

#### 3.3.2 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla stanovena z hmotnosti a rozměrů vzorků.

Objemová hmotnost se vypočítá ze vzorce:

$$\rho_c = \frac{m}{l \cdot b \cdot h}$$

kde:

$\rho_c$  - Objemová hmotnost vzorku [kg/m<sup>3</sup>]

m - hmotnost vzorku [kg]

b - šířka zkušební tělesa [m]

h - výška zkušební tělesa [m]

l - délka zkušební tělesa [m]

### 3.3.3 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku na ztvrdlých maltách

Na zkušebních tělesech byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku dle ČSN EN 1015-11 [45]. Pevnosti byly zkoušeny po 7 a 28 dnech.

Pevnost v tahu za ohybu se stanovuje tříbodovým zatěžováním až do porušení zkušebních těles. Pevnost v tahu za ohybu se vypočte pomocí vzorce:

$$R_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

kde:

F - maximální zatížení na zkušební těleso [N]

L - 100 mm vzdálenost mezi osami podpěrných válců [mm]

b - šířka zkušebního tělesa [mm]

h - výška zkušebního tělesa [mm]

Výsledkem je aritmetický průměr tří pevností v ohybu, který je zaokrouhlen na 0,01 MPa.

Pevnost v tlaku se zkouší na dvou částech těles, které vznikly po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku se vypočte pomocí vzorce:

$$R_c = \frac{F}{A}$$

kde:

F - maximální zatížení na zkušební těleso [N]

A - 1600 mm<sup>2</sup> plocha tlačných destiček [mm<sup>2</sup>]

Výsledkem je aritmetický průměr šesti pevností v ohybu, který je zaokrouhlen na 0,01 MPa.

### 3.3.4 Nasákavost

Nasákavost byla stanovena po 28 dnech. Tělesa byla uložena do nádoby s vodou na distanční podložky. Po dobu 24 hodin byla tělesa ponechána ve vodě o teplotě 21±1 °C, poté osušena a zvážena. Po vysušení do konstantní hmotnosti v sušárně při 80 °C byla tělesa zvážena. Nasákavost se vypočte pomocí vzorce:

$$N = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100$$

kde:

$m_n$  - vzorek nasycen vodou [kg]

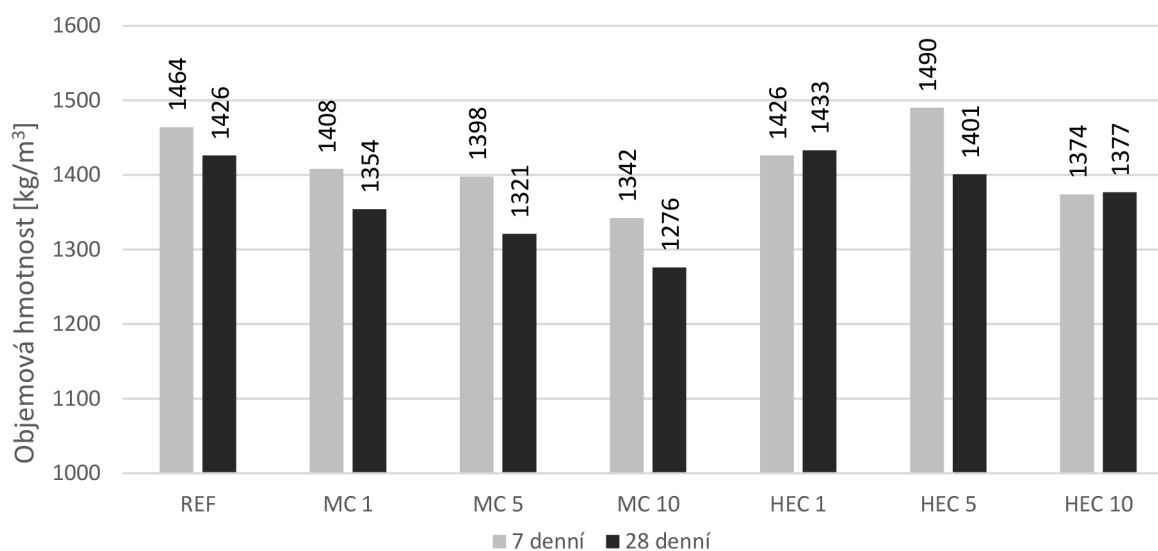
$m_s$  - vysušený vzorek [kg]

Výsledky byly zaokrouhleny na 0,01 %.

### 3.4 Výsledky a diskuze

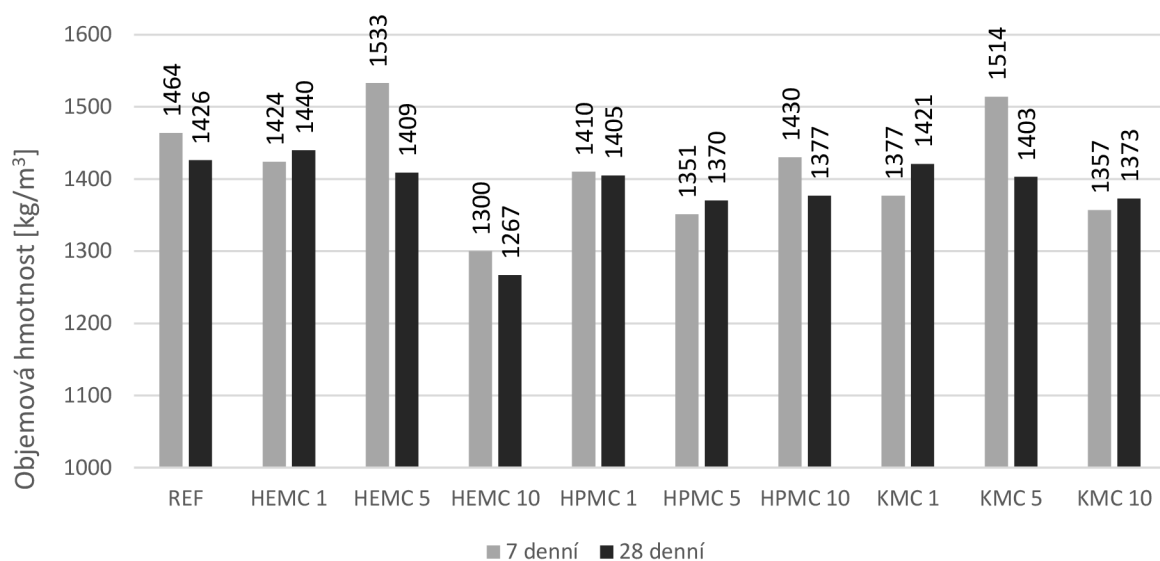
Tabulka 3 - Naměřené a vypočítané hodnoty mechanických vlastností vápenných malt

vzorek	Rozliv [mm]	7 dní			28 dní			Nasákavost [%]
		Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	
REF	257	1464	0,21	0,64	1426	0,59	1,29	20,7
MC 1	250	1408	0,19	0,59	1354	0,48	1,23	20,1
MC 5	220	1398	0,17	0,54	1321	0,55	1,20	20,3
MC 10	245	1342	0,14	0,52	1276	0,50	1,15	20,9
HEC 1	198	1426	0,47	0,65	1433	0,60	1,26	21,0
HEC 5	115	1490	0,19	0,53	1401	0,55	1,25	22,5
HEC 10	95	1374	0,37	0,83	1377	0,63	1,42	22,9
HEMC 1	193	1424	0,45	0,78	1440	0,67	1,23	20,6
HEMC 5	123	1533	0,25	0,61	1409	0,59	1,30	20,5
HEMC 10	140	1300	0,40	0,71	1267	0,74	1,55	19,4
HPMC 1	155	1410	0,50	0,75	1405	0,75	1,22	20,9
HPMC 5	99	1351	0,26	0,78	1370	0,59	1,29	23,2
HPMC 10	135	1430	0,18	0,66	1377	0,53	1,43	22,7
KMC 1	188	1377	0,43	0,72	1421	0,68	1,79	20,8
KMC 5	123	1514	0,25	0,62	1403	0,65	1,28	21,0
KMC 10	140	1357	0,58	1,11	1373	0,85	1,70	19,8

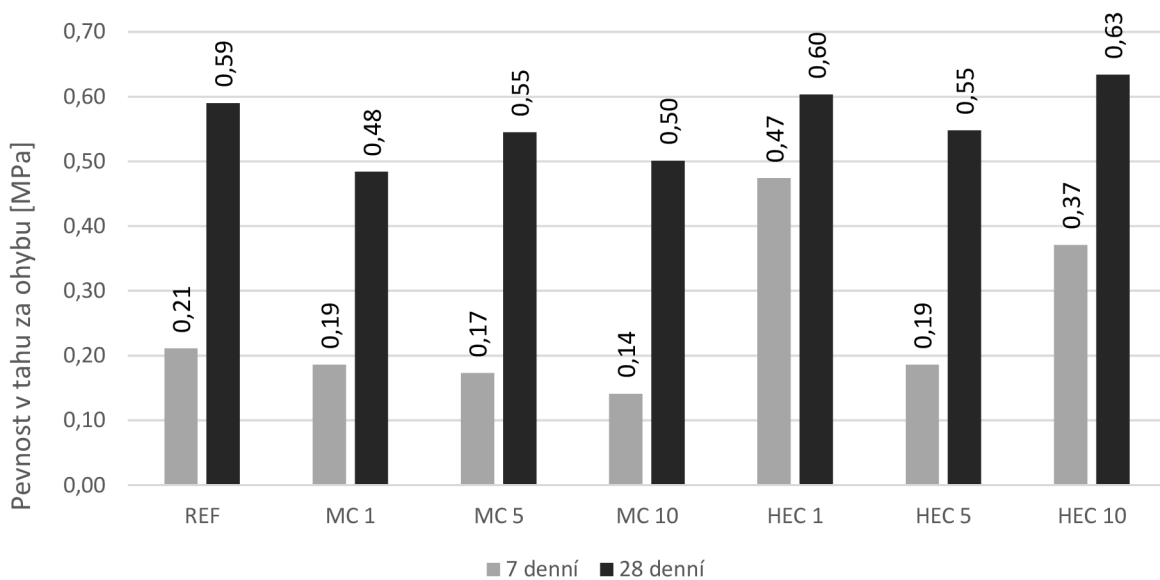


Obrázek 17: Porovnání objemových hmotností malt s přidavkem MC a HEC po 7 a 28 dnech

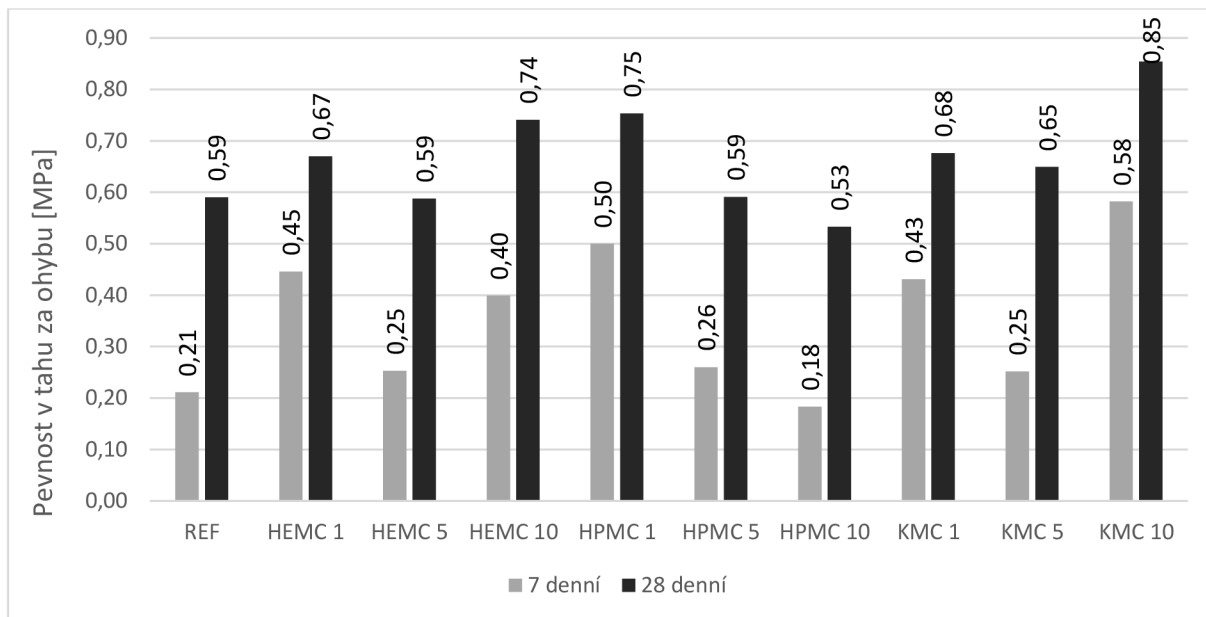




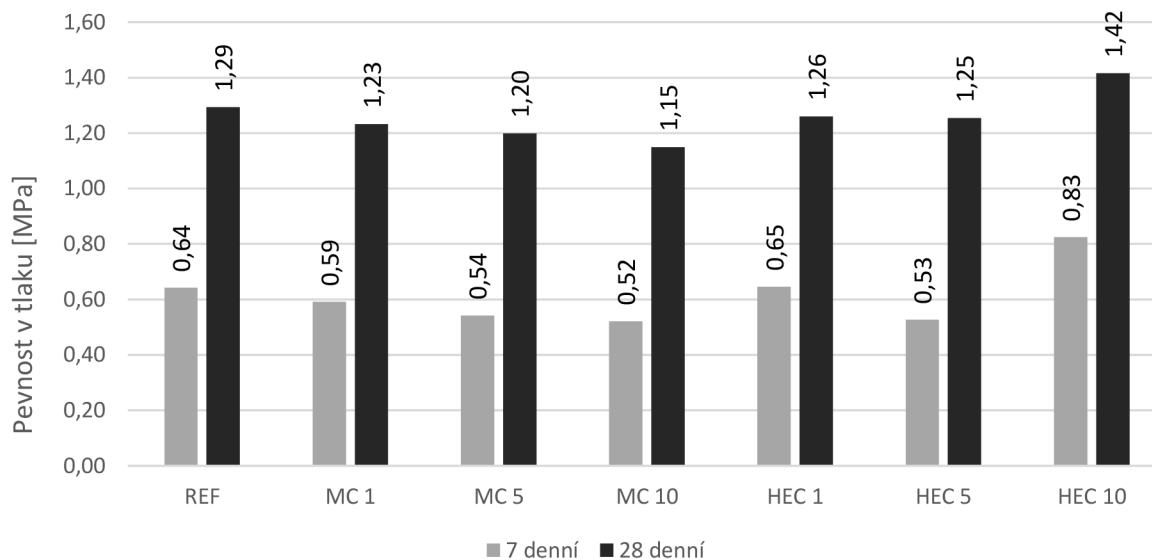
Obrázek 18: Porovnání objemových hmotností malt s přísadkou HEMC, HPMC a KMC po 7 a 28 dnech



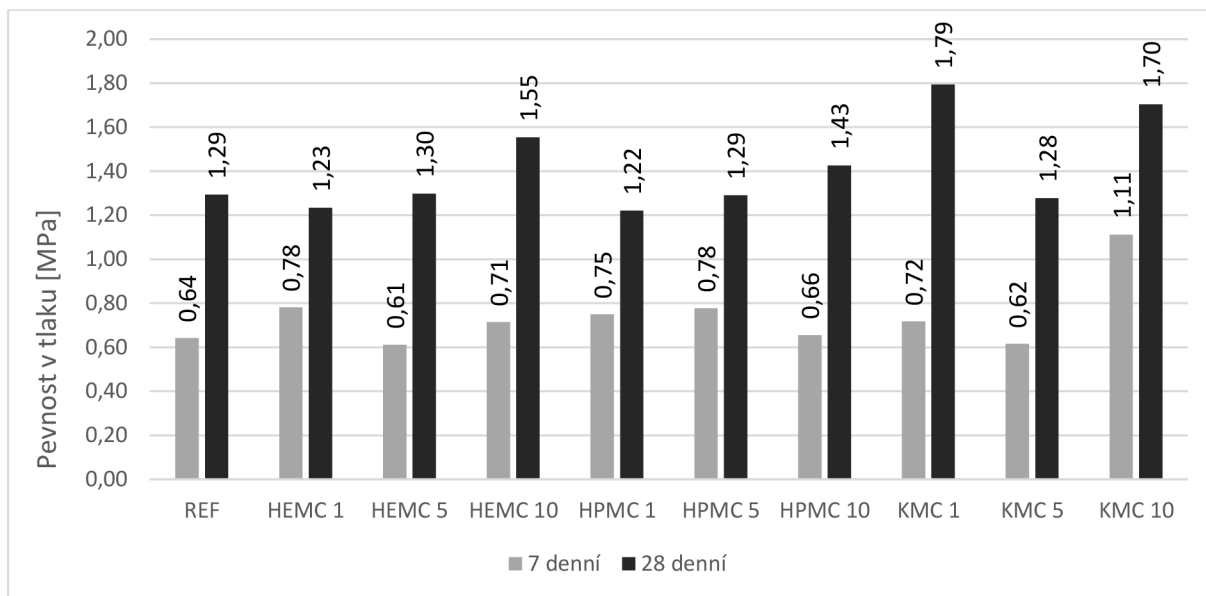
Obrázek 19: Porovnání pevností v tahu za ohybu malt s přísadkou MC a HEC po 7 a 28 dnech



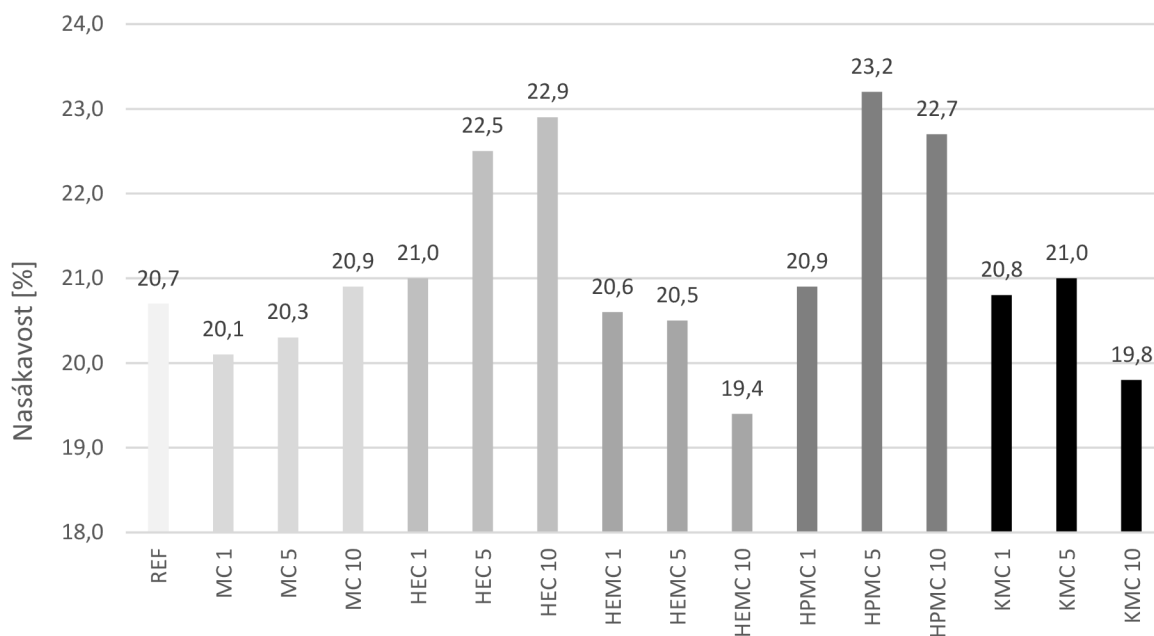
Obrázek 20: Porovnání pevností v tahu za ohybu malt s přísávkem HEMC, HPMC a KMC po 7 a 28 dnech



Obrázek 21: Porovnání pevností v tlaku malt s přísávkem MC a HEC po 7 a 28 dnech



Obrázek 22: Porovnání pevností v tlaku malt s přidavkem HEMC, HPMC a KMC po 7 a 28 dnech



Obrázek 23: Porovnání hodnot nasákavosti vápenných malt s přidavkem etherů celulózy

Z obrázků č. 18 a 19 je patrné, že hodnoty objemových hmotností se zvyšujícím se obsahem všech etherů celulózy klesají a v závislosti na čase dochází jen k jejich nepatrnému snížení z důvodu odpaření vody ze vzorku. U vzorků HEC 1, 10, HEMC 1, HPMC 5 a KMC 1 a10 lze pozorovat zanedbatelné zvýšení objemových hmotností po 28 dnech, které může odkazovat na pomalejší vysychání vzorků s ohledem na vodoretěnné vlastnosti přísad. Roli může hrát též ne zcela dokonalá homogenita vzorků.

Z obrázků č. 20 a 21 znázorňujících vývin pevností v tahu za ohybu lze pozorovat, že některé druhy CE mají příznivý vliv na vývin pevností i při nižších dávkách zejména HEMC, HPMC a KMC, avšak u většiny použitých CE se s vyšší dávkou zvyšuje i pevnost. Poklesy pevností při vyšších dávkách u některých CE lze vysvětlit špatnou zpracovatelností v čerstvém stavu. Nejvíce ovlivňujícím parametrem je viskozita příslušného etheru a jeho druh.

Z obrázků č. 22 a 23 znázorňujících vývin pevností v tlaku lze usoudit, že se hodnoty příliš neliší oproti referenčnímu vzorku. Stejně jako tomu bylo u pevností v tahu za ohybu, tak i zde mají největší vliv HEMC a KMC. U vzorků MC můžeme pozorovat poklesy pevností v závislosti na zvětšujícím se přídávku. U vzorků HEC, HEMC, HPMC lze pozorovat opačný efekt. Při porovnání vlivu dávky etheru celulózy na pevnosti v tahu za ohybu a tlaku malt je u některých použitých přísad evidentní pokles hodnot při použití 0,5 % dávky oproti 0,1 % a 1 % přídávku (HEC, HEMC, KMC), zejména po 7 dnech. Tento pokles bude patrně způsoben větším množstvím zadržované vody v maltě, čemuž odpovídají i zvýšené objemové hmotnosti těchto vzorků. Zdá se, že použitím 0,5 % přídávku některých etherů celulózy, dojde k vyšší retenci vody než při jejich vyšších dávkách, což se sice může zprvu projevit poklesem pevností, ale v dlouhodobém horizontu mohou pevnosti těchto vzorků překonat hodnoty vzorků malt s vyšším obsahem CE. Podobná závislost byla pozorována při použití hydroxypropylguaru (HPG) jako vodoretěnné přísady [50]. Tato problematika bude předmětem dalšího studia.

Na obrázku č. 24 lze pozorovat jen nepatrný rozdíl v nasákavosti. Vzorky s vyšší hodnotou nasákavosti než referenční vzorek mají nejspíš vyšší obsah otevřených pórů, z tohoto důvodu mohou více nasáknout. Důvodem může být i to, že vyšší dávka etheru měla vliv na zpracovatelnost. U vzorků kde se zhoršila zpracovatelnost nejspíš došlo ke špatnému zhutnění. Tyto vzorky lze poznat podle hodnoty rozlivu v tabulce 3.

Výsledky zkoušek nepotvrdily negativní vlastnosti etherů celulózy na pevnosti z teoretické části. Nejlepší mechanické vlastnosti lze pozorovat u malt s přísávkem HEMC a KMC. Vzorky MC ze zjištěných výsledků dosahují horších vlastností než referenční vzorek a z tohoto důvodu bych považoval jeho použití za účelem zlepšení mechanických vlastností jako nevhodné. Přísávek HPMC v dávkách vyšších než 0,5 % výrazně zhorší zpracovatelnost směsi (obr. 25) a hutnění této směsi je velmi obtížné. Drobná konzistence by rovněž značně omezovala aplikaci této směsi na svislé plochy.



Obrázek 24: Vzorek HPMC, důvod možného poklesu pevností se zvyšující se dávkou etheru  
a) dávka 0,1 g, b) dávka 0,5 g, c) dávka 1 g

## 4 Závěr

V bakalářské práci věnované vápenným maltám s přídavkem etherů celulózy je v teoretické části zpracováno základní rozdělení etherů celulózy podle zpracování a popsán vliv na reologické chování stavebních pojiv, které je ethery celulózy ovlivněno nejvíce. Většina dostupné literatury o etherech celulózy je zaměřena na studie ovlivnění vlastností materiálů na bázi cementu. Existuje pouze sporadické množství odborné literatury o vlivu etherů celulózy na ztvrdlý stav malt na bázi vápna. Tato bakalářská shrnuje dosud známé vlivy etherů celulózy na vápenné malty a rozšiřuje toto aktuální téma o nové poznatky, zejména o porovnání vlivu různých druhů etherů celulózy na mechanické vlastnosti jemnozrnných vápenných malt.

V praktické části byly ověřovány předpoklady z části teoretické; zdali ethery celulózy pozitivně či negativně ovlivňují mechanické vlastnosti vápenných malt. Výsledky získané v praktické části nepotvrdily předpoklady z části teoretické, které použití etherů celulózy do vápenných malt spíše nepodporovaly. Bylo zjištěno, že některé druhy etherů celulózy mají příznivý vliv na vývin pevností i při nižších dávkách, zejména HEMC, HPMC a KMC. S rostoucím přídavkem etherů celulózy došlo ke snížení rozlivu vápenné malty, a tedy k vyšší retenci vody a horší zpracovatelnosti. Na nasákavost jemnozrnných vápenných malt mají ethery celulózy jen nepatrný vliv. Nejlepší mechanické vlastnosti byly pozorovány u malt s přídavkem HEMC a KMC. Methylcelulóza měla negativní vliv na mechanické vlastnosti vápenných malt, a proto se jeví jako nevhodná pro toto použití. Pro další studium vlivu etherů celulózy na zejména dlouhodobé vlastnosti vápenných malt se jeví jako nejperspektivnější HEMC a KMC.

## 5 Seznamy

### 5.1 Seznam použité literatury

- [1] SUHAS, P.J.M. CARROTT, Randhir SINGH, Monika CHAUDHARY a Sarita KUSHWAHA. *Cellulose: A review as natural, modified and activated carbon adsorbent*. India, 2016.
- [2] MORITA, T., H. ITO, S. KIMIO a S. KIRIYAMA. *Cellobiose is extensively digested in the small intestine by beta-galactosidase in rats*. Japan, 2008.
- [3] KOMÁREK, J., a kol. *Deriváty celulózy*. Praha: SNTL, 1966.
- [4] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Pavel ROVNANÍK a Jitka MALÁ. *Stavební chemie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 72 s. ISBN 978-80-7204-902-8.
- [5] PATURAL Laetitia, Philippe MARCHAL, Alexandre GOVIN, Philippe GROSSEAU, Bertrand RUOT a Olivier DEVÈS. *Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars*. France, 2010.
- [6] POURCHEZ, J., B. RUOT, J. DEBAYLE, E. POURCHEZ a P. GROSSEAU. *Some aspects of cellulose ethers influence on water transport and porous structure of cement-based materials*. France, 2009.
- [7] RUTESH, D.H. *Overview of pharmaceutical excipients used in tablets and capsules*. Drug topics. USA, 2008.
- [8] JOINT FAO/WHO EXPERT COMMITTEE ON FOOD ADDITIVES. *Compendium of food additive specifications*. 79th Meeting. Roma: FAO and WHO, 2014. ISBN 978-92-5-108607-0. <http://www.fao.org/3/a-i4144e.pdf>
- [9] HONGBO FINE CHEMICAL. *Hydroxypropyl Cellulose (HPC)*. China. [http://www.yxhbchem.com/product\\_detail\\_en/id/3.html](http://www.yxhbchem.com/product_detail_en/id/3.html)
- [10] DE SILVA, D.J. a J.M. OLVER. *Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) lubricant facilitates insertion of porous spherical orbital implants*. London, 2005.
- [11] SIDLEY CHEMICAL, *Hydroxypropyl Methylcellulose – Applications and Benefits*. <http://celluloseether.com/sidleycel-hydroxypropyl-methylcellulose/>

[12] BUILDING MATERIALS. *Roles And Applications of Cellulose Ether in Environmentally Friendly.*

<http://celluloseether.com/wp-content/uploads/2016/01/Roles-And-Applications-of-Cellulose-Ether-in-Environmentally-Friendly-Building-Materials.pdf>

[13] BANFILL, P.F.G., *The rheology of fresh mortar*, Mag. Concr. Res. 43(154) (1991).

[14] SIDLEY CHEMICAL, *What are the factors affecting the water retention of cellulose ether.* <http://celluloseether.com/what-factors-affecting-water-retention-cellulose-ether/>

[15] POURCHEZ, J., GROSSEAU, P., RUOT, B. *Changes in C<sub>3</sub>S Hydration in the Presence of Cellulose Ethers*, Cement and Concrete Research, Vol.40, 2010, p.179–188.

[16] POURCHEZ, J., GOVIN, A., GROSSEAU, P., GUYONNET, R., GUILHOT, B., RUOT, B. *Alkaline Stability of Cellulose Ethers and Impact of Their Degradation Products on Cement Hydration*, Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, p.1252–1256.

[17] POURCHEZ, J., GROSSEAU, P., RUOT, B. *Current understanding of cellulose ethers impact on the hydration of C<sub>3</sub>A and C<sub>3</sub>A-sulphate systems*, Vol.39, 2009, p.664–669.

[19] MIDDENDORF, B a H BUDELMANN. *Proceedings of the Fifth Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials.* Belgium, 1995.

[20] CHRISTOFFERSON, M.R., WEIJNEN J.M.P.C., G.M. VAN ROSMALEN. *Journal of Crystal Growth.* 1982, (58).

[21] WITKAMP, G.J., J.P. VAN DER EERDEN a G.M. VAN ROSMALEN. *Journal of Crystal Growth.* 1982, (102).

[22] LIU, S.T. a G.H. NANCOLLAS. *Journal of Colloid and Interface Science.* 1975, (52).

[23] BOSBACH, D., M.F.HOCHELLA, *Chemical Geology.*1996, (132).

[24] AMATHIEU, L., R.BOISTELLE, *Journal of Crystal Growth.* 1986, (79).

[25] AMATHIEU, L., R.BOISTELLE, *Journal Crystal Growth.* 1988, (88).

[26] BADENS, E., S.VESSLER, R.BOISTELLE, *Journal Crystal Growth.* 1999, 189/190

[27] SEABRA, M.P., PAIVA H., LABRINCHA J.A., FERREIRA V.M. *Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars.* Constr. Build. Mater., 2009.



- [28] MALINOWSKI, R., *Ancient mortars and concretes, durability aspects, mortars, cements and grouts used in conservation of historic buildings*. In: Proceedings of the symposium. Rome: ICCROM; 1981.
- [29] MOSQUERA, M.J., BENITEZ D., PERRY S.H. *Pore structure in mortars applied on restoration*. Cem. Concr. Res., 2002.
- [30] IZAGIRRE, A., LANAS J., ALVAREZ J.I. *Behaviour of a starch as a viscosity modifier for aerial lime-based mortars*. Carbohyd. Polym., 2010.
- [31] ARANDIGOYEN, M., ALVAREZ J.I. *Carbonation process in lime pastes with different water/binder ratio*. Mater. Constr., 2006.
- [32] PAIVA, H., ESTEVES L.P., CACHIM P.B., FERREIRA V.M. *Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents*. Constr. Build. Mater., 2009.
- [33] RIXOM, R., MAILVAGANAM N. *Chemical admixtures for concrete*. London: E&FN Spon, 1999.
- [34] POURCHEZ, J., PESCHARD A., GROSSEAU P., GUYONNET R., GUILHOT B., VALLEE F. *HPMC and HEMC influence on cement hydration*. Cem. Concr. Res., 2006.
- [35] CHATTERJI, S. *Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents*. Cem. Concr. Compos., 2003.
- [36] IZAGUIRRE, A., LANAS J., ALVAREZ J.I. *Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents*. Cem. Concr. Comp., 2011.
- [37] LANAS, J., ALVAREZ J.I. *Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behaviour*. Cem. Concr. Res., 2003.
- [38] ARANDIGOYEN, M., PEREZ B.J.L., BELLO L.M.A., ALVAREZ J.I. *Lime-pastes with different kneading water: pore structure and capillary porosity*. Appl. Surf. Sci., 2005.
- [39] RILEM: *Recommended tests to measure the deterioration of stone and assess the effectiveness of treatment methods*. Mater. Struct., 1980.
- [40] MARAVELAKI-KALAITZAKI, P. *Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry*. Cem. Concr. Res., 2007.
- [41] COLLET, F., BART M., SERRES L., MIRIEL J. *Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials*. Constr. Build. Mater., 2008.

[42] LANAS, J., PEREZ B.J.L., BELLO M.A., ALVAREZ G.J.I. *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cem. Concr. Res., 2004.

[43] ČSN EN 1015-3 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Platnost od 1. 3. 2000.

[44] ČSN EN 1015-2 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt*. Platnost od 1. 10. 1999.

[45] ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Platnost od 1. 6. 2000.

[46] ŽIŽLAVSKÝ, T., VYŠVAŘIL M., BAYER P. *Fyzikálně mechanické a mikrostrukturní vlastnosti vápenných malt modifikovaných vodoretenčními přísadami na bázi biopolymerů*. In Sborník konference Construmat 2017. Bratislava: STU v Bratislave, v tisku.

## 5.2 Seznam použitých zkratk a chemických vzorců

<b>CE</b>	Etery celulózy
<b>VEA</b>	Příspěvky zvyšující viskozitu
<b>MC</b>	Methylcelulóza
<b>EC</b>	Ethylcelulóza
<b>HEC</b>	Hydroxyethylcelulóza
<b>HPMC</b>	Hydroxypropylmethylcelulóza
<b>HEMC</b>	Hydroxyethylmethylcelulóza
<b>KMC</b>	Karboxymethylcelulóza
<b>PVC</b>	Polyvinyl chlorid
<b>C-S-H</b>	Kalcium-silikát hydrát
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Alit
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Trikalciumaluminát
<b>HH</b>	Hemihydrát síranu vápenatého
<b>DH</b>	Dihydrát síranu vápenatého
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	Síran vápenatý
<b>CO<sub>2</sub></b>	Oxid uhličitý
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Hydroxid vápenatý
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Uhličitan vápenatý
<b>TG</b>	Termogravimetrická analýza
<b>GG</b>	Guma guar

### **5.3 Seznam tabulek**

Tabulka 1 - Vlastnosti použitých etherů celulózy .....	29
Tabulka 2 - Receptury vzorků.....	30
Tabulka 3 - Naměřené a vypočítané hodnoty mechanických vlastností vápenných malt.....	32

## 5.4 Seznam obrázků

Obrázek 1: D-glukóza ve Fischerově projekci .....	10
Obrázek 2: Celobióza .....	10
Obrázek 3: Struktura celulóзовého řetězce.....	11
Obrázek 4: Struktura methylcelulózy.....	13
Obrázek 5: Struktura ethylcelulózy .....	13
Obrázek 6: Struktura hydroxyethylcelulózy .....	14
Obrázek 7: Struktura hydroxypropylcelulózy .....	14
Obrázek 8: Struktura karboxymethylcelulózy.....	15
Obrázek 9: Struktura hydroxypropylmethylcelulózy .....	15
Obrázek 10: Struktura hydroxyethylmethylcelulózy .....	16
Obrázek 11: Retenční schopnost u čerstvé malty smíchané s různými typy CE, korelace mezi metodami ASTM a DIN. Označením P1, U2, N7, H1 a N1 se liší v molekulární hmotnosti [6]. .....	19
Obrázek 12: Příklady CE filmů na rozhraní vzduchových dutin. Pozorování cementové směsi polarizační světelnou mikroskopií (vlevo). Zkoumání prostorového rozložení (vpravo) [6]. ..	20
Obrázek 13: Schematický přehled dopadu tloušťky a propustnosti pláště C-S-H během hydratace C3S [15]. .....	21
Obrázek 14: Výsledky rtuťové pórozimetrie pro zkoumané malty: a) REF malta, .....	26
Obrázek 15: Výsledky mechanických pevností malt s HPMC a GG a) pevnosti v tahu za ohybu, b) pevnosti v tlaku .....	27
Obrázek 16: Výsledky cyklického zmrazování a rozmrazování malt s HPMC a GG .....	27
Obrázek 17: Výsledky cyklického zmrazování a rozmrazování a) vzorky REF po 1 cyklu, ..	28
Obrázek 18: Porovnání objemových hmotností malt s přídavkem MC a HEC po 7 a 28 dnech .....	32
Obrázek 19: Porovnání objemových hmotností malt s přídavkem HEMC, HPMC a KMC po 7 a 28 dnech.....	33
Obrázek 20: Porovnání pevností v tahu za ohybu malt s přídavkem MC a HEC po 7 a 28 dnech .....	33

Obrázek 21: Porovnání pevností v tahu za ohybu malt s přídavkem HEMC, HPMC a KMC po 7 a 28 dnech.....	34
Obrázek 22: Porovnání pevností v tlaku malt s přídavkem MC a HEC po 7 a 28 dnech .....	34
Obrázek 23: Porovnání pevností v tlaku malt s přídavkem HEMC, HPMC a KMC po 7 a 28 dnech .....	35
Obrázek 24: Porovnání hodnot nasákavosti vápenných malt s přídavkem etherů celulózy ....	35
Obrázek 25: Vzorek HPMC, důvod možného poklesu pevností se zvyšující se dávkou etheru a) dávka 0,1 g, b) dávka 0,5 g, c) dávka 1 g.....	37