

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

**Studium vlastností vápenných omítek a malt s příměsí
lehčeného metakaolínu**

Study of properties of lime mortars and plasters with
admixture of light-weight metakaolin

Student:

Bc. Pavel Mec

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Vavro, Ph.D.

Ostrava 2010

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 30. listopadu 2010

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 30. listopadu 2010

.....
Podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Vavrovi, Ph.D. za odbornou pomoc. Rád bych také poděkoval Ing. Františku Pticenovi za zabezpečení vzorků některých vstupních surovin a zajištění průmyslového způsobu výpalu lehčených metakaolínů. Poděkování patří také pracovníkům Laboratoře stavebních hmot FAST VŠB-TU Ostrava za ochotu a pomoc při pracích v laboratoři.

Anotace

Cement a vápno představují hlavní pojiva, používaná v současném stavebnictví. Světová produkce cementu přesahuje 1,5 miliardy tun, produkce vápna a vápenného hydrátu se pohybuje okolo 150 mil. tun. Výroba těchto pojiv je vysoce energeticky náročná a odhaduje se, že přispívá 5 – 7% k celosvětové produkci oxidu uhličitého.

Výzkum v materiálovém inženýrství stavebních hmot se proto začíná zaměřovat na hmoty, které by byly schopny v maltovinách částečně nahradit zejména cement, jejichž výroba by byla více šetrná k životnímu prostředí a které by zároveň přispívaly ke zlepšení užitných vlastností betonu a malt. Jedním z materiálů, který splňuje uvedené nároky je metakaolín, produkt tepelné aktivace kaolínu a kaolinitem bohatých jíílů. V tuzemském stavebnictví dosud našel metakaolín uplatnění především jako aktivní příměs do vápenných malt, používaných při opravách historických budov.

Předložená diplomová práce se zabývá přípravou a hodnocením vlastností vápenných malt s obsahem lehčeného metakaolínu, který se vyznačuje nízkou objemovou hmotností a zvýšenou pórovitostí. Lehčený metakaolín představuje zcela nový typ metakaolínu, který dosud není průmyslově vyráběn a komerčně nabízen na trhu. Kromě pozitivního vlivu na mechanické a trvanlivostní vlastnosti by ve formě plniva měl přispívat k podstatnému zlepšení tepelných vlastností malt a omítek. Tato diplomová práce je jedním z prvních příspěvků v problematice lehčeného metakaolínu.

Annotation

Cement and lime represent the main binder used in the present building. World production of cement exceeds 1.5 billion tonnes, the production of lime and hydrated lime moves around 150 million tonnes. Production of these binders is highly energetically intensive and it is estimated to contribute 5-7% of global production of carbon dioxide.

Therefore the research in building materials begins to focus on (matters) materials, which would be able to replace the cement in mortars partially; their production would be more environmentally friendly and it would also contribute to improvement of the concrete and mortar use properties. One material that meets these requirements is metakaoline, the product of thermal activation of kaolin and kaolinite-rich clays. In the domestic construction industry the metakaolin is used mainly as an active ingredient to lime mortar which is used for the historic buildings repairs.

This thesis deals with the preparation and evaluation of properties of lime mortars containing lightweight metakaoline, which is characterized by low density and increased porosity. Lightweight metakaoline is a completely new type of metakaoline, which has not yet been industrially manufactured and commercially offered on the market. Apart from the positive influence on the mechanical and durability properties, in the form of aggregates it should contribute to a substantial improvement of thermal properties of mortars and plasters. This thesis is one of the first contributions in the (issue) field of lightweight metakaoline problem.

Klíčová slova: metakaolín, lehčený metakaolín, vápenné malty, stavební hmoty

Keywords: metakaolin, light-weight metakaolin, lime mortars, building materials

Obsah

Seznam zkratk	10
1. Úvod	11
2. Látky s pucolánovými vlastnostmi	12
2.1. Pucolánové látky používané ve stavebnictví	12
2.2. Vliv pucolánů na vlastnosti vápenných malt	14
2.3. Charakteristika komerčně vyráběných tuzemských metakaolínů.....	18
3. Vstupní suroviny pro výrobu lehčeného metakaolínu	20
4. Popis přípravy lehčených metakaolínů	24
4.1. Míchání a homogenizace surovin	24
4.2. Výpal a mletí lehčeného metakaolínu.....	26
5. Zkoušení materiálových vlastností	28
5.1 Popis přípravy zkušebních těles a zkoušek materiálových vlastností	28
5.1.1 Příprava zkušebních těles.....	28
5.1.2 Stanovení konzistence rozlitím	28
5.1.3 Pevnosti v tahu za ohybu	29
5.1.4 Pevnosti v tlaku.....	29
5.1.5 Stanovení mrazuvzdornosti.....	30
5.1.3 Pevnosti v tahu za ohybu	30
5.1.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	30
5.2 První fáze – zkoušení vlastností vápenných malt modifikovaných lehčeným metakaolínem.....	31
5.3. Druhá fáze – zkoušení vlastností vápenných malt modifikovaných lehčeným metakaolínem zjemněné frakce	41
5.4. Třetí fáze – zkoušení vápenných malt modifikovaných komerčními metakaolíny	53
5.5. Čtvrtá fáze – zkoušení vápenných malt modifikovaných komerčními metakaolíny s vylehčením pomocí expandovaného perlitu.....	61
5.6. Experimentální náhrada kameniva i pojiva lehčeným metakaolínem	70
5.7. Ověření vlivu vlhčení v době zrání na výsledné vlastnosti malt	71
6. Vyhodnocení výsledků	75
7. Závěr	85
Seznam použitých zdrojů a literatury	87

Seznam tabulek.....	89
Seznam obrázků	92
Seznam příloh	94

Seznam zkratk

ρ_s	sytná hmotnost
ρ_v	objemová hmotnost
R_f	pevnost v tahu za ohybu
R_{prum}	průměrná pevnost v tahu za ohybu
R_c	pevnost v tlaku
R_{cpr}	průměrná pevnost v tlaku
λ	součinitel tepelné vodivosti

1. Úvod

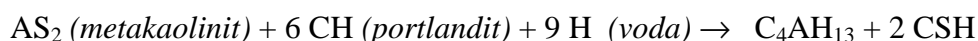
V současné době jsou ve stavebnictví kladeny stále větší požadavky na energetickou nenáročnost staveb. Jsou to především rostoucí ceny energií, které nutí projektanty vytvářet objekty s čím dál nižší spotřebou energie po dobu životnosti objektu. Stejně jako u nových budov, je patrná snaha o snížení energetické spotřeby také u existujících objektů, a to jejich úpravami nebo rekonstrukcí. Na trhu stavebními hmotami proto dnes existuje široká škála produktů s tepelně izolačními vlastnostmi, které výrazně přispívají k primárnímu nebo druhotnému snížení spotřeby tepelné energie. Současným trendem je především výstavba nízkoenergetických či dokonce pasivních budov, pro které je již vyvinuta celá řada zdících materiálů s velmi nízkými hodnotami tepelné vodivosti. U dříve postavených objektů je možno v hojné míře pozorovat provádění dodatečných zateplení pomocí pěnového polystyrénu, případně minerální vlny.

Jedním z materiálů, který má své využití při snížení energetické náročnosti nově budovaných či rekonstruovaných staveb jsou také tepelně izolační malty a omítky, u nichž je zvýšené pórovitosti a tím pádem nízké tepelné vodivosti dosaženo použitím lehkého kameniva. Vylehčení těchto pojivových systémů však s sebou přináší často výrazné snížení pevnostních vlastností. To lze u řady typů malt eliminovat zvýšením množství cementu v receptuře. V případě čistě vápenných systémů, které mají své použití např. u historických objektů, je však použití cementu nežádoucí. U vápenných malt a omítek může zvýšením pórovitosti docházet nejen k poklesu hodnot pevností, ale také ke zhoršení trvanlivostních vlastností. Jednou z variant, která by mohla řešit tento problém, je použití tzv. lehčeného metakaolínu. Metakaolín s běžnými hodnotami objemových hmotností se pro zlepšení funkčních vlastností malt v současnosti již (byť v malé míře) používají. Lehčený metakaolín však představuje zcela nový typ metakaolínu, který dosud není komerčně nabízen na trhu, ale který by mohl mít v budoucnu využití ve stavebním a žáruvzdorném průmyslu. K jeho přípravě se používá vhodné plastické složky s vysokým obsahem kaolinitu a lehčiva, jehož vyhořením při kalcinaci dochází ke vzniku otevřených pórů, vylehčujících celý systém.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo laboratorně připravit několik typů lehčených metakaolínů na bázi kaolínu a jílu se zvýšeným obsahem lignitické složky a následně studovat základní fyzikální, mechanické a trvanlivostní vlastnosti vápenných malt s různým obsahem těchto pucolánů. Z důvodu původně nepředpokládaných technologických a organizačních komplikací při přípravě lehčených metakaolínů, které byly příčinou ne zcela uspokojivých výsledků, bylo studium doplněno o tepelně izolační malty vylehčené obsahem experlitu.

2. Látky s pucolánovými vlastnostmi

Jako pucolány se obecně označují křemičité nebo hlinito-křemičité látky, které jsou samy o sobě chemicky stabilní a nevyznačují se žádnými hydraulickými vlastnostmi, tj. po smíchání s vodou samy netuhnou a netvrdnou. Jsou-li však semlety na jemný prášek, reagují za normální teploty v přítomnosti vody s rozpuštěným hydroxidem vápenatým za tvorby nerozpustných sloučenin. Při této reakci vznikají hydratační produkty, vykazující pojivové vlastnosti podobné fázím, vznikajícím při hydrataci cementu. Jedná se o vápenaté hydrosilikáty označované jako C-S-H gely a vápenaté hydroalumináty, které společně zásadně ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti maltovin. Fázově lze reakce pucolánů s hydroxidem vápenatým znázornit pomocí následujících chemických rovnic [15]:



Termín pucolán je odvozen od místního označení kyselých, intermediárních až bazických pyroklastik nebo sopečných skel (tj. ryolitových, trachytových až bazaltových sopečných popelů a tufů a/nebo pemzy), které byly, zejména v jižní Itálii, označovány jako puzzolano, resp. pozzuoli. Uvedené přírodní látky se používaly k přípravě hydraulických maltovin už ve starověké Fénicii, v Řecku a zejména v Římě [10, 15,16]. Nejznámějším místem jejich výskytu a starověké těžby byla oblast u města Pozzuoli (Puteoli) u Neapole, poblíže vulkanické struktury Vesuvu. Po rozpadu římské říše se však od jejich využití na mnoho století upustilo a k jejich novému používání se stavitelé vrátili prakticky až v 18. století, a to po zjištění, že pucolánové materiály byly Římany používány k výrobě voděodolných maltovin [15]. V současné době se pucolány využívají především jako přísada do betonů a malt díky jejich příznivému působení na mechanické, fyzikální a jiné vlastnosti. Pucolánové suroviny se také často využívají při opravách a rekonstrukcích historických objektů, díky jejich autentičnosti s historickými materiály.

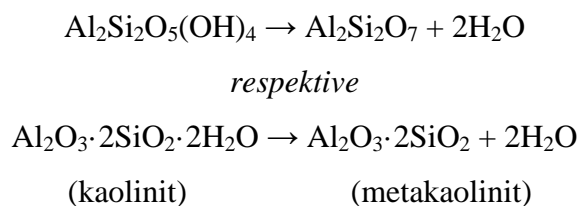
2.1. Pucolánové látky používané ve stavebnictví

Pucolánovými vlastnostmi se vyznačuje řada přírodních (primárních) nebo průmyslových (umělých, druhotných) látek. Představiteli přírodních pucolánů jsou především některá pyroklastika (sopečné vyvrženiny) jako sopečné popely a tufy nebo

vulkanická skla (např. pemza nebo perlit). Z přírodních hornin se pucolánovými vlastnostmi vyznačují rovněž některé sedimenty s vysokým obsahem amorfního oxidu křemičitého, např. diatomity nebo spongolity [8, 9]. Použití pucolánů přírodního původu je známo již ze starověkého Říma. Ze sopečného popela a drcené pemzy z lokality Puzzuoli a z vápence z Cum, byl za císaře Claudia (asi v roce 45 n.l.) vyráběn cement s hydraulickými vlastnostmi, kterého bylo např. využito při stavbě významného přístavu v Ostii. Z „betonu“ na bázi vápna a drcené pemzy nebo keramických střepek byly postaveny významné další římské stavby - Pantheon, Colloseum a Konstantinova bazilika. Mimo území dnešní Itálie je jednou z nejvýznamnějších staveb, postavených z hydraulických maltovin, impozantní akvadukt Pont du Gard u města Nîmes v jižní Francii, pocházející z 1. stol. n.l.

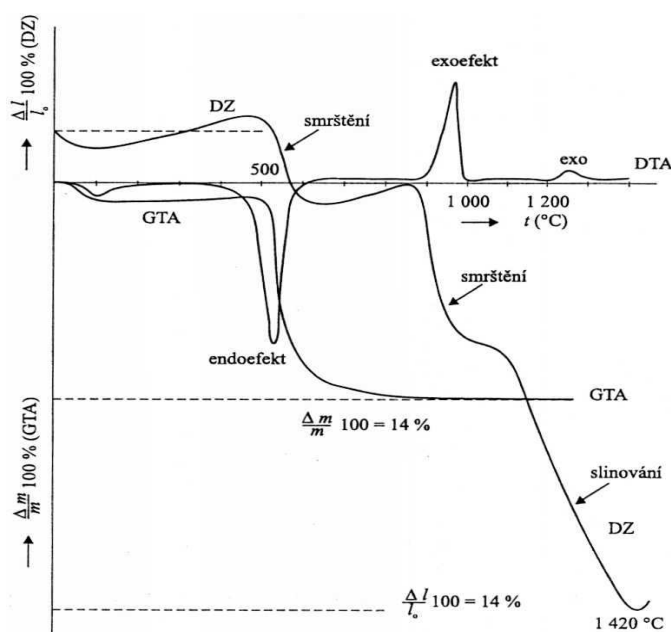
K umělým pucolánům se řadí látky s obdobnými vlastnostmi a často i podobným složením jako mají přírodní pucolány. Na rozdíl od nich se však nevyskytují v přírodě, ale jedná se o antropogenní produkty. Jde tedy o materiály uměle připravené, případně látky vznikající jako druhotný, či odpadní produkt průmyslových výrob. Typickými představiteli umělých pucolánů jsou suché úletové (vysokoteplotní) popílký ze spalování uhlí. Ty mohou být, z hlediska konkrétní pucolánové aktivity, ovlivněny řadou nečistot i různorodostí chemického a zrnitostního složení. Podobné vlastnosti jako popílek vykazuje také granulovaná vysokopecní struska, která však je většinou řazena mezi tzv. latentně hydraulické látky. Dalšími umělými pucolány jsou křemičité úlety (mikrosilika), odpady z keramické výroby (cihelná moučka) nebo odpady z výroby papíru. Pucolánové vlastnosti mají také některé tepelně upravované (kalcinované), případně aktivované přírodní horniny (jíly nebo bauxit). Ve světě jsou používány i další, pro nás „netradiční“ pucolány, např. popel z rýžových slupek [9].

Metakaolíny jsou produkty tepelné aktivace kaolínu nebo jílu bohatých na kaolinit. Interval vhodné termické aktivace (kalcinace) je poměrně široký, aktivní složka – metakaolinit – vzniká při teplotách zhruba 600-900°C. Termický rozklad kaolinitu na metakaolinit lze popsat následujícími zjednodušenými chemickými rovnicemi:



Jedná se o endotermní reakci, která je spojena s výrazným úbytkem hmotnosti v souvislosti s odstraněním chemicky vázané vody v krystalové struktuře. Pokud by

pokračovalo vypalování kaolinitu na vyšší teploty (> 900-1000°C), proběhly by složité přeměny metakaolinitu a vznik spinelových fází, cristobalitu a mullitu. Průběh výpalu a vznik jednotlivých fází lze při laboratorních podmínkách dokumentovat na DTA/TG křivce (obr. 1.). Je však potřeba upozornit, že k tvorbě metakaolinitu dochází v závislosti na velikosti částic kaolinitu, dokonalosti jeho krystalové struktury (tzv. krystalinitě) a rychlosti a podmínkách zahřívání. Z praktického hlediska je konkrétní teplota kalcinace ovlivněna zejména podobou výpalku (prášek, granulát, peletka, nudlička, drť, cihla apod.), typem pece (rotační, tunelová, vozokomorová, šachtová, fluidní, komorová atd.) a dobou teplotní výdrže v peci [13]. Metakaolín je ve světě produkován zejména americkými výrobci, v Evropě je výroba známa zejména z Velké Británie (Imerys, Ltd.) a Francie (AGS). V České republice se výrobou metakaolínu zabývají tři výrobci – firmy Sedlecký kaolin, a.s. Božičany, České lupkové závody, a.s. Nové Strašecí a Keramost, a.s. Most.



Obr. 1. Ideální průběh zahřívání kaolinitu vyjádřený DTA/TG křivkou

2.2. Vliv pucolánů na vlastnosti vápenných malt

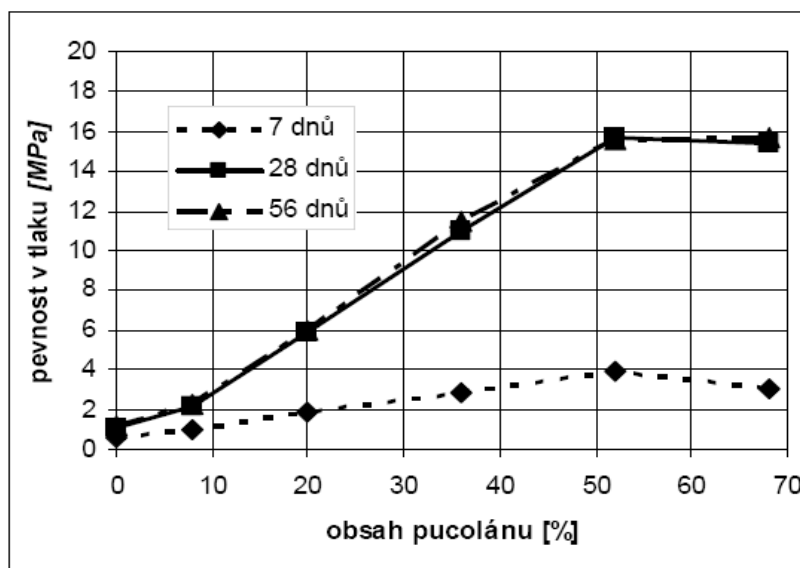
Vápno představovalo, a to v dlouhém časovém období od raného středověku až do počátku 20. století, hlavní pojivo, používané v evropském stavebnictví pro přípravu zdících malt a fasádních i interiérových omítek. Z dnešního pohledu měla v minulosti výroba vápna poměrně velmi jednoduchou technologii, při níž se používaly suroviny, které byly místně dostupné a ve většině případů obsahovaly příměsi jílu. Proto výsledné pálené vápno obsahovalo také hydraulické složky – jednalo se o tzv. přirozeně hydraulické vápno. Tyto

hydraulické vlastnosti zvyšovaly mechanickou a korozní odolnost vápenných maltovin. Příkladem takového hydraulického vápna bylo např. pražské staroměstské vápno, pálené z podolských a branických vápenců, označované jako Pasta di Praga [13, 15]. Během historie svého používání byly vlastnosti vápenných malt navíc často upravovány přidáním celé řady přísad a příměsí organického nebo anorganického charakteru. Škála organických příměsí byla zřejmě velmi široká a zahrnovala např. šťávy z nejrůznějšího ovoce, pivo, zvířecí krev, žluč, moč, dále mléko, tvaroh, vejce, různé oleje, mýdla apod. [10, 15]. Z anorganických materiálů je na území České republiky známo zejména používání přísad drcených nebo mletých cihel, keramických střepů, jemně drceného skla, různých druhů strusek, později pak také popelů a popílků ze spalování organických látek [10, 15, 17, 22]. Účelem aplikace těchto částečně hydraulických nebo pucolánových složek bylo zejména zlepšení zpracovatelnosti a přidržitelnosti a urychlení tvrdnutí vápenné omítky, zvýšení pevnosti a odolnosti malty. V současné době však není hydraulické vápno na území České republiky vyráběno, jeho roli postupně zcela převzaly omítky a malty na bázi cementu, popř. cementu a vápna. Počátek modifikování („nastavování“) vápenných omítek cementem je datován zhruba do 20. let minulého století, od 50. let se pak vápenocementové omítky staly hlavním druhem povrchových úprav zdiva na většině staveb. V praxi památkové péče je však použití cementu pro opravy objektů, postavených s využitím vápenných („předcementových“) technologií často neakceptovatelné a hodnocené jako zásah narušující autenticitu památky.

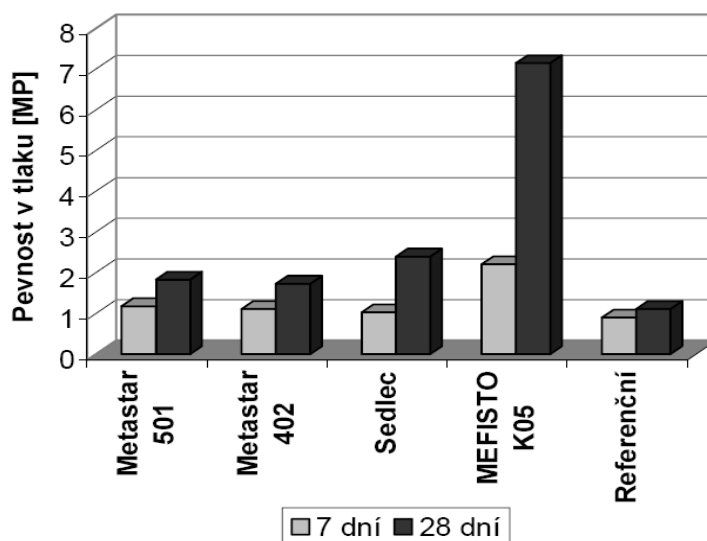
Vápna vyráběná v současnosti jsou připravována pálením velmi čistých surovin a výsledný obsah oxidu vápenatého či hydroxidu vápenatého dosahuje až 98% a obsah hydraulických složek je téměř nulový. Pro dosažení hydraulických vlastností, zlepšení užitečných parametrů, ale také k zajištění historické podobnosti při použití na památkově chráněných objektech, je tedy do vápenných systémů potřeba dodávat hydraulické látky. Proto je dnes pozornost řady technologů a pracovníků památkové péče věnována studiu, přípravě a v poslední době i aplikaci vápenných omítek a malt s přísadami pucolánů.

Z technogenních pucolánů je největší pozornost v této oblasti věnována právě metakaolínu. Modifikace metakaolínem prokazatelně zvyšuje zejména mechanické parametry vápenných malt [11, 18, 21]. Již po sedmi dnech jsou dosahované pevnosti v tlaku i tahu za ohybu vyšší než referenční nemodifikované malty. Dosahované pevnosti po 28 dnech jsou až desetinásobkem pevnosti referenční nemodifikované malty [11, 18]. Na druhé straně je velmi výhodné také to, že použití metakaolínu výrazně nemění základní vlastnosti malty, jako je objemová hmotnost či nasákavost. Zachovává se také vysoká pórovitost, která je důležitá při použití omítek na historických objektech a umožňuje rychlejší odvod vlhkosti ze zdiva [21].

Použití metakaolínu také částečně příznivě ovlivňuje tepelně technické vlastnosti malty [21]. Výsledné vlastnosti jsou závislé jak na typu použitého metakaolínu, tak také na jeho množství (viz Obr. 2. a 3). U jednotlivých metakaolínů závisí také na způsobu jejich výroby, především teplotě výpalu, ale také na surovinách, použitých pro výrobu metakaolínu. Z provedených studií se ukazuje, že optimální je použití 25 až 50% modifikace metakaolínem vzhledem k hmotnosti použitého vápna (Obr. 2.). V tomto poměru jsou dosahovány nejlepší výsledky [18]. Při použití menšího množství dochází ke zhoršování vlastností a hodnoty se blíží vápenným maltám bez metakaolínu. V případě použití většího množství metakaolínu dochází opět ke snižování výsledných vlastností [18]. Tato tendence může mít jako jedno z vysvětlení, nedostatečné množství hydroxidu vápenatého, který je důležitý pro pucolánovou reakci.



Obr. 2. Vliv obsahu metakaolínu na pevnost vápenopucolánové malty v tlaku [17]



Obr. 3. Pevnosti v tlaku zkoušených vápenných malt modifikovaných různými typy metakaolínů [17]

Exteriérové vápenné omítky jsou intenzivním způsobem vystavovány působení povětrnosti a proto je jedním ze základních cílů laboratorního výzkumu v oblasti vápenných maltovin snaha o zvýšení odolnosti omítek vůči vlivům mrazu, solí a agresivního prostředí. Zvýšení odolnosti vůči agresivním vlivům by však nemělo probíhat na úkor zhoršení difuzních vlastností omítky, především paropropustnosti. K takovému zhoršení dochází při použití cementu, který výrazně ovlivní pórovitost malty. Proto se výzkumy obracejí k jiným alternativám a provedené zkoušky mrazuvzdornosti ukazují výrazně pozitivní vliv metakaolínu na zvýšení odolnosti proti mrazovým cyklům [19] při nezměně difuzních vlastností. Studie dokonce ukazují pozitivní vliv zmrazovacích cyklů na pucolánovou reakci. Při zmrazovacích cyklech dochází ke zvýšení pucolánové reaktivity a tím k nárůstu pevnosti a výsledná pevnost po zmrazování může být vyšší než pevnost nezmrazovaného vzorku [19]. Příklady příznivého ovlivnění materiálových vlastností vápenných malt metakaolínem uvádějí Tab. 1. a 2.

Tab. 1. Složení maltových směsí na bázi vápenný hydrát a metakaolín [19]

Složka/Vzorek č.	1	2	3	4
vápenný hydrát [g]	100	100	100	100
metakaolín Božičany [g]	100	100	0	0
normový písek [g]	300	300	300	300
voda [g]	166	166	100	100
uložení po zmrazování	voda	vzduch	voda	vzduch

Tab. 2. Výsledky stanovení materiálových vlastností vápenné malty, modifikované příměsí metakaolínu [19]

Vzorek	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tahu za ohybu po 40 zmrazovacích cyklech [MPa]	Pevnost v tlaku po 40 zmrazovacích cyklech [MPa]	Pevnost v tlaku nezmrazované malty [MPa]
1	1375	1,7	12,0	6,7
2	1385	0,8	10,6	
3	1593	0	0	1,3
4	1582	0,1	1,1	

U omítek se také často zkouší lomově mechanické vlastnosti [20]. Omítky namáhané agresivním prostředím jsou náchylnější k šíření trhlin, které je výrazné především díky rozpínavosti vody při přeměně na led. Je proto vhodné snažit se zvýšit lomovou houževnatost a tím zvýšit odolnost materiálu. Výsledky prokazují, že metakaolínem modifikované omítky

mají mnohonásobně vyšší lomovou houževnatost než omítky nemodifikované [20]. Z experimentálních výsledků vyplývá, že modifikace metakolínem velmi pozitivně ovlivňuje vlastnosti vápenných omítek a malt. Díky svému složení jsou tyto materiály také velmi vhodné při použití při opravách historických objektů.

V současné době rovněž probíhá velký rozvoj v používání tepelně izolačních materiálů, a to díky stoupajícím cenám energií. V oblasti omítek a malt zatím ve velké míře dochází ke zlepšování fyzikálních vlastností, avšak tepelně technické vlastnosti bývají částečně opomíjeny. V tomto směru je potřeba věnovat se výzkumu materiálů použitelných jednak jako pojiv tak také plniv vápenných malt a zvyšujících použitelnost omítek a malt jako tepelně izolačních materiálů. Metakaolín se zde jeví jako velmi perspektivní surovina, jelikož ve fázích jeho přípravy je možno ovlivnit jeho výsledné tepelně technické vlastnosti například přidáním lehčiv, které zvýší pórovitost a tím sníží objemovou hmotnost výsledného metakaolínu.

2.3. Charakteristika komerčně vyráběných tuzemských metakaolínů

Česká republika patří v současnosti k významným světovým producentům kaolínu a je jednou z mála evropských zemí, produkujících metakaolín. Tuzemské metakaolíny, dostupné na komerčním trhu, jsou vyráběny výhradně z kvalitních jemnozrnných plavených kaolínů (zrnitostní frakce 0-20 μm) s vysokým obsahem částic pod 2 μm (cca 50 až 70 hmot.%, např. značky Mefisto K 05, N META 4, S META 4, I META 4, KM 40 apod.) nebo z jílovců (metalupěk Mefisto L 04 atd.). Metakaolíny vyrobené z plavených kaolínů typu Sedlec Ia, Imperiál, KN-1, KDG, Rokle apod. vynikají výbornou kvalitou, ale mají zpravidla výrazně vyšší cenu než běžná anorganická pojiva používaná ve stavebním průmyslu. Vybrané vlastnosti jemnozrnných plavených kaolínů s možností použití pro výrobu metakaolínů, rozlišených podle těžební oblasti, chemického složení, zrnitosti a mineralogického složení jsou uvedeny v Tab. 3. [13].

V Tab. 4. je pak uvedeno chemické složení a reologické vlastnosti některých vybraných komerčních metakaolínů vyráběných z těchto jemnozrnných kaolínů. Jemnost mletých produktů je v podstatě podobná a pohybuje se v zrnitostní frakci 0-20 mikrometrů se středním zrnem v rozmezí asi 2 μm až 5 μm . Významnější jsou mineralogické rozdíly, reaktivita metakaolínů a míra rozlití (rozprostření), která může velmi ovlivňovat licí a reologické vlastnosti suspenzí a tím pádem také maltovin, vyrobených s použitím metakaolínu.

Tab.3. Vybrané chemicko-technologické vlastnosti jemnozrnných karlovarských, podbořanských a kadaňských plavených kaolínů pro výrobu metakaolínu [13]

Vlastnost kaolínu - vysušený vz. [hm. %]	Jemnozrnný kaolín		
	Karlovarsko SK Božičany	Podbořansko Kaolin Hlubany	Kadaňsko Keramost
SiO ₂	45-55	50-60	47-58
Al ₂ O ₃	36-38	32-34	35-37
Fe ₂ O ₃	0,7-1,9	0,5-0,8	0,9-1,7
TiO ₂	0,1-0,8	0,4-0,5	0,4-0,6
CaO	0,1-0,3	0,1-0,2	0,1-0,2
MgO	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3
K ₂ O	0,7-1,8	0,4-0,8	1,3-1,7
Na ₂ O	0,01-0,1	0,01-0,02	0,01-0,06
Ztráta žíháním	13,0-14,0	11,5-12,5	12,0-13,0
Obsah kaolinitu	85-95	80-90	85-90
Obsah slíd	3-10	1-5	3-10
Obsah křemene	1-5	5-15	1-5
Obsah částic pod 2 μm	55-70	40-55	50-60

Tab.4. Chemické vlastnosti a míra rozptření vybraných českých metakaolínů vyráběných z jemnozrnných plavených kaolínů (typické hodnoty) - [13]

Vlastnost metakaolínu	Značka metakaolínu				
	Mefisto K05	N META 4	S META 4	I META 4	KM 40
SiO ₂ [hm. %]	59,00	53,52	53,08	52,94	52,35
Al ₂ O ₃ [hm. %]	37,50	43,42	42,47	41,04	40,10
Fe ₂ O ₃ [hm. %]	0,70	0,91	1,03	1,64	1,45
TiO ₂ [hm. %]	0,53	0,59	0,33	0,36	0,74
CaO [hm. %]	0,11	0,32	0,33	0,26	0,38
MgO [hm. %]	0,26	0,25	0,24	0,30	0,40
K ₂ O [hm. %]	0,72	0,45	0,95	1,63	1,43
Na ₂ O [hm. %]	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
ztráta žíháním [hm. %]	1,21	0,43	1,43	1,81	3,12
míra rozlití [mm]	130	200	130	160	150

3. Vstupní suroviny pro přípravu lehčeného metakaolínu

V České republice je v současnosti vyráběno přibližně 15 obchodních značek metakaolínů, které mají různě úspěšné uplatnění v oblasti výroby stavebních hmot, gumárenství, výrobě plastů nebo nátěrových hmot. Převážná většina produkovaných metakaolínů je vyráběna na bázi jemnozrnných plavených kaolínů (viz podkap. 2.3.), případně zpevněných jílovců (lupků) s vysokým obsahem kaolinitu [13].

Jedním ze zcela nových produktů na trhu s metakaolínů se může do budoucna stát tzv. lehčený metakaolín, vyznačující se nízkou objemovou hmotností, zvýšenou pórovitostí (Obr.3.) a nasákavostí (Tab.5.). Pro své pseudoplastické vlastnosti a vysokou makroporozitu může lehčený metakaolín sloužit jako vazba v žáromateriálech, ale také jako vysoce žáruvzdorné lehčivo, které představuje jistý teplotní (a tedy fázový) „předstupeň“ lehčeného šamotu. Ve stavebním průmyslu se může uplatnit například jako plnivo v tepelně izolačních omítkách, jako aktivní příměs v lehčených geopolymerech, jako bílé porézní plnidlo apod.

Lehčený metakaolín není prozatím v České republice komerčně produkován, proběhly však již první poloprovozní pokusy s jeho výrobou [14].



Obr.4. Mikrofotografie pórové struktury lehčeného metakaolínu LE 3 [14]

Směs pro výrobu lehčeného metakaolínu obsahuje jednak samotnou kaolinitickou surovinu (plavený kaolín nebo kaolinitický jííl různého chemického a mineralogického složení) a dále spalitelné složky - dřevní biomasu nebo jemně mletou uhelnou substanci.

Výhodou tohoto způsobu výroby, kdy je lehčivo uměle dodáváno k plastické složce, je volitelnost pórovitosti lehčeného metakaolínu (Tab.5.).

Tab.5. Vlastnosti kusových lehčených metakaolínů a jejich porovnání s „klasickými“ metakaolíny [14]

Metakaolín	Měrná hmotnost	Objemová hmotnost	Celková pórovitost	Nasákavost	Tepelná vodivost
	kg/m ³	kg/m ³	obj. %	hm.%	W/m.K
S META	2630	2360	10,3	26,0	0,200
N META	2540	1830	27,9	30,0	0,098
LE 2	2530	1580	37,5	61,7	0,074
LE 3	2580	1400	45,7	129,6	0,035

Pozn.: kusové metakaolíny jsou metakaolíny po kalcinaci, ale před konečnou mechanickou úpravou mletím

K přípravě lehčeného metakaolínu lze rovněž využít přírodní kaolinitické suroviny primárně bohaté na jemný lignit jako jsou např. jíly typu Nero nebo OSR. Lignitický jíl OSR může ovšem představovat také alternativní, dosud nevyužívanou, surovinu pro výrobu „klasického“ metakaolínu, jehož vlastnosti jsou plně srovnatelné s některými komerčními produkty [12].

Pro přípravu lehčených metakaolínů, testovaných v této diplomové práci byly, kromě vody, použity následující vstupní komponenty:

1. plastické složky (viz Tab.6.):

- jemnozrnný plavený kaolín Sedlec Ia, běžně komerčně produkován společností Sedlecký kaolin, a.s. Božičany,
- jíl OSR, představující doprovodnou surovinu s uhelnou (lignitickou) příměsí z ložiska Osmosa na Karlovarsku.

Tab.6. Chemické složení vstupních plastických surovin (v hm.%)

Oxid	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	z.ž.
kaolín Sedlec Ia	47,42	36,28	0,85	0,18	0,34	0,23	0,94	0,04	13,62
jíl OSR	48,20	30,50	2,09	1,19	0,01	0,16	1,35	0,04	16,36

2. lehčiva:

- smrkové a bukové piliny z výroby stavebního řeziva (Tab.7.),
- úletový popílek z teplárenských kotlů firmy ArcelorMittal Ostrava, a.s. s vysokým podílem nedopalu (Tab.8. a 9.).

Tab.7. Granulometrie a sypná hmotnost použitých pilin

Velikost síta	> 2mm	1 – 2mm	0,5 - 1mm	0,25 - 0,5mm	< 0,25mm	sypná hmotnost
smrkové piliny	13 hm.%	20 hm.%	22 hm.%	25 hm.%	20 hm.%	160 kg.m ⁻³
bukové piliny	4 hm.%	14 hm.%	41 hm.%	27 hm.%	14 hm.%	190 kg.m ⁻³

Tab.8. Parametry popílků ArcelorMittal (v hm.%)

Vzorek	nedopal	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	volné CaO	MgO	S	w
Po1-S1.14,4N	14,4	46,6	19,3	8,8	4,2	2,7	0,18	0,82
Po2-S1.14,4N	14,4	46,6	19,4	8,8	4,2	2,7	0,19	0,66
Po3-S1.16,4N	16,4	46,1	19	8,7	4,2	2,5	0,18	0,83
Po4-S1.12,6N	12,6	46,7	19	8,8	4,4	2,6	0,19	0,66
Po2-S2.13,9N	13,9	47,1	19,6	8,4	3,9	2,4	0,23	0,7
Po3-S2.13,5N	13,5	47,7	19,7	8,8	4,9	2,4	0,31	0,62
Po4-S2.12,9N	12,9	47,1	19,4	8,8	5,7	2,3	0,4	0,62
Po1-S1.29,4	29,4	46,3	17,3	7,2	2,9	1,7	0,14	1,07
Po2-S1.11,9	11,9	49,1	19,4	9,1	3,9	2,2	0,26	0,52
Po3-K.5,09	5,1	49,7	20	11,2	5	3,1	0,32	0,33
Po1-S1.25,29	25,3	40,6	15,9	10,1	4,6	3	0,21	0,39
Po4-S1.43,1	43,1	41,5	17,2	7,5	3,5	2,2	0,18	0,53

Pozn.: w = vlhkost

Tab.9. Zrnitost použitého popílku ArcelorMittal

Parametr	X ₁₀	X ₅₀	X ₉₉	< 10μm	< 30μm	< 90μm
Popílek	3,20μm	43,82μm	241,15μm	29,50%	44,90%	67,03%

Pozn.: kompletní výsledky granulometrické analýzy popílku ArcelorMittal jsou uvedeny v Příloze č.1

Plavený kaolín Sedlec Ia je vyráběn již od roku 1892 a představuje jednu z neznámějších obchodních značek kaolínů nejen v České republice, ale ve světě vůbec. Jeho mineralogickou hlavní složkou je kaolinit, jehož obsah dosahuje až okolo 90% hm. Příměsí tvoří především slídové minerály a malé množství křemene. Obsah částic pod 2μm se pohybuje mezi 60 – 70%. Tento produkt se běžně používá v průmyslu při výrobě porcelánu,

ostatní užitkové a sanitární keramiky, elektroporcelánu, výrobu žáruvzdorných materiálů, jako pojivo v tužkárenství nebo jako přísada v kosmetice [23].

Jíl OSR se vyznačuje primární přítomností rozptýlené lignitické substance. Výhodou této suroviny je, že v rámci úpravy nemusí procházet procesem plavení, čímž se poměrně výrazným způsobem snižují výrobní náklady výsledného metakaolínu. Při studiu vlastností cementových malt modifikovaných metakaolínem, vyrobeným z jílu OSR, bylo prokázáno, že jejich mechanické a trvanlivostní vlastnosti se vyrovnají maltám, u kterých byly použity komerčně vyráběné metakaolíny, např. I-META 4. Jistou nevýhodou jílu OSR pro výrobu lehčeného metakaolínu je fakt, že obsah uhelné složky bývá často dosti proměnlivý a proto i v tomto případě je nutno doplňovat surovinovou směs sekundárně přidaným lehčivem.

Piliny představují základní druh lehčiva, používaného pro vylehčení keramického střepeu např. v cihlářské výrobě. V případě této diplomové práce byly zvoleny piliny ze dvou druhů dřevin. Prvními byly **piliny** pocházející z **tvrdého dřeva**, konkrétně buku. Udává se, že piliny z tvrdého dřeva (buk, dub) mají částice spíše kulovitějšího tvaru, čemuž by měl následně odpovídat i tvar výsledných pórů po výpalu. Dalším typem bylo **dřevo** měkké, konkrétně **smrkové**, které má piliny spíše protáhlejšího tvaru. Obě tyto suroviny byly získány z místních dřevozpracujících výroben. Jelikož se nejedná o cíleně vyrobený produkt, nelze proto očekávat garantované složení nebo zrnitost. Je tedy potřeba věnovat pozornost jak zrnitosti, kdy je vhodné piliny prosítovat a odstranit částice o velikosti nad 2mm.

Jako další typ lehčiva byl zvolen **úletový popílek**, produkováný teplárnou společností ArcelorMittal Ostrava, a.s. Důvodem pro použití tohoto konkrétního typu popílku je extrémní obsah nespálených látek, který dosahuje 15 – 30%, v extrémních případech až 40% hm. Tento nedopal při výpalu kaolínu vyhoří a vzniklé plyny vytvoří nepřímé vylehčení metakaolínu. Roční produkce těchto popílků dosahuje asi 30.000 tun (Vlček, 2010, ústní sdělení).

4. Popis přípravy lehčených metakaolínů

Lehčený metakaolín, resp. metakaolín se zvýšenou pórozitou dosud nepředstavuje standardní komerční produkt, nabízený na trhu stavebních hmot v České republice. Příprava lehčených metakaolínů, testovaných v této diplomové práci, proto probíhala částečně v laboratorních, částečně v poloprovozních až provozních podmínkách. Pro přípravu lehčeného metakaolínu neexistují žádné technické normy nebo definované výrobní postupy, proto její jednotlivé fáze vycházely především z předchozích zkušeností, získaných zejména v souvislosti s výrobou „klasických“ metakaolínů běžných objemových a sypných hmotností.

4.1. Míchání a homogenizace surovin

Základním procesem při přípravě lehčeného metakaolínu je vytvoření výrobní směsi, složené z plastické složky (tj. z kaolínu nebo kaolinitem bohatého jílu) a lehčiva ve zvoleném poměru a jejich následná dokonalá homogenizace.

Kaolinitem bohaté plastické suroviny byly v této diplomové práci představovány jednak plaveným kaolínem obchodní značky Sedlec Ia a dále pak alternativní surovinou - kaolinitickým jílem OSR, který je charakteristický zvýšeným obsahem rozptýlené uhelné (lignitické) složky. Jako lehčivo byly použity dva druhy pilin (smrkové a bukové) a také vysokoteplotní popílek s vysokým obsahem nedopalu z teplárny firmy ArcelorMittal Ostrava, a.s. Všechny tyto složky a jejich vlastnosti byly detailně popsány v kap.3. diplomové práce.

Před vlastním mícháním směsí proběhla především úprava pilin, spočívající v jejich vysušení a prosátí, čímž se odstranily částice kůry a dřevní štěpky větší než 2mm. Naopak plastické suroviny nebylo nutno nijak zvláště upravovat. To platí zejména pro nudličkovaný plavený kaolín Sedlec Ia, který je standardním komerčním produktem s garantovanými fyzikálními a chemickými parametry. V případě lignitického jílu OSR, který představuje doprovodnou surovinu z kaolínového ložiska Osmosa bez dalšího průmyslového využití, se provedla základní vizuální kontrola, zda v surovině nejsou obsaženy cizorodé částice – valouny, konkrce nebo složky biologického původu.

Před mísením bylo rovněž zapotřebí zvolit množství použitého lehčiva ve směsi. Na základě předchozích znalostí a výsledků prvotních výzkumů [14] byl navržen konstantní obsah 20% hmotnosti lehčiva z celkové hmotnosti výrobní směsi. Obě složky byly smíchány spolu s vodou, jejíž množství bylo voleno u každé směsi individuálně tak, aby umožnilo vytvoření dobře míchatelného těsta. Míchání probíhalo v laboratorní míchačce, běžně

používané pro přípravu čerstvých cementových malt podle ČSN EN 196-1 [1]. Pro mísení nebyl určen žádný konstantní časový interval, cílem bylo především optimální promísení a homogenizace směsi. Proto mísení probíhalo tak dlouho až bylo subjektivním pozorováním usouzeno, že směs je dostatečně homogenní.

Vzájemnou kombinací jednotlivých složek bylo vytvořeno následujících šest směsí (vždy v poměru 80% hmotnosti plastické složky a 20% lehčiva):

- kaolín Sedlec Ia a smrkové piliny,
- kaolín Sedlec Ia a bukové piliny,
- kaolín Sedlec Ia a popílek ArcelorMittal,
- jííl OSR a smrkové piliny,
- jííl OSR a bukové piliny,
- jííl OSR a popílek ArcelorMittal.



Obr. 5. Laboratorní míchačka

Po dokončení míchání byla směs vylita na kuchyňský pečící plech tak, aby vytvořená vrstva měla tloušťku přibližně 2cm. Takto připravená směs byla uložena na 24 hodin do laboratorní sušárny, kde proběhlo sušení, jehož účelem bylo odstranění fyzikálně vázané vody při teplotě $105\pm 5^{\circ}\text{C}$. Po vysušení vznikla tělesa deskovitého tvaru a kompaktní konzistence.

4.2 Výpal a mletí lehčeného metakaolínu

Tělesa vzniklá mícháním a sušením, popsanými v předchozí podkapitole, byla opatrně vyjmuta ze sušících plechů a zabalena do smršťovací potravinářské fólie tak, aby bylo zabráněno zpětné absorpci vzdušné vlhkosti. Následně byly výsušky vypáleny provozním způsobem ve vozokomorové peci společnosti Sedlecký kaolin, a.s. Božičany na teplotu přibližně 780°C (Pticen, 2010, ústní sdělení). Vzniklé výpalky byly podrceny na laboratorním kladivovém drtiči. Granulometrie vzniklých produktů je dokumentována v Tab.10.

Tab.10. Granulometrie a sypná hmotnost lehčených metakaolínů

Velikost síta	> 1mm	0,5 - 1mm	0,25 - 0,5mm	< 0,25mm	sypná hmotnost ρ_s
Sedlec Ia + buk	13 hm. %	27 hm. %	42,7 hm. %	17,3 hm. %	693 kg.m ⁻³
Sedlec Ia + smrk	9,3 hm. %	52 hm. %	28,7 hm. %	10 hm. %	622 kg.m ⁻³
Sedlec Ia + popílek	12 hm. %	28,7 hm. %	29,3 hm. %	30 hm. %	707 kg.m ⁻³
OSR + buk	8,3 hm. %	23,7 hm. %	29,3 hm. %	38,7 hm. %	648 kg.m ⁻³
OSR + smrk	7 hm. %	21 hm. %	24 hm. %	48 hm. %	580 kg.m ⁻³
OSR + popílek	8 hm. %	18,3 hm. %	53,7 hm. %	20 hm. %	614 kg.m ⁻³

Testování připravených lehčených metakaolínů probíhalo ve dvou základních, časově na sebe navazujících fázích:

- V první fázi laboratorního výzkumu byly ověřovány vlastnosti vápenných malt s obsahem 15% a 30% hm. lehčených metakaolínů, jejichž zrnitostní složení je uvedeno v Tab.10 a výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti jsou detailně popsány v podkap. 5.2. Z důvodu velmi nízkých konečných pevností vápenopucolánových malt, které se nijak významně nelišily od referenční malty bez metakaolínu nebo byly dokonce i nižší, bylo přistoupeno k úpravě zrnitosti lehčených metakaolínů.
- Ve druhé fázi testování proto bylo provedeno rozsítování lehčených metakaolínů s tím, že byl zachycen zůstatek na síti 2mm. Částice o velikosti menší než 2mm byly přemlety na jemnější zrnitost na laboratorním mlýně. Výsledné lehčené metakaolíny pak vznikly smícháním 80% jemnozrnného podílu a 20% nadsítého

nad 2mm. Bohužel ani v případě vápenných malt s takto upravenými („přemletými“) lehčenými pucolány nebyly získány očekávané materiálové parametry (viz podkap. 5.3.). Pro objasnění příčiny nízkých konečných pevností a poměrně nízké mrazuvzdornosti vápenopucolánových malt byly provedeny zkoušky zrnitosti lehčených metakaolínů, stanovení pucolánové reaktivity metodou podle Chapella a ve dvou případech také analýza fázového složení pomocí RTG-difrakce. Zrnitost upravených metakaolínů byla kontrolována metodou laserové granulometrie, provedené na Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě (analytik p. Daria Nováková). Výsledky granulometrické analýzy metakaolínů na bázi Sedlec Ia a smrkových, resp. bukových pilin jsou uvedeny v Přílohách č. 2 a 3. Výsledky analýz jsou podrobně diskutovány v kap.6.

Po ukončení druhé fáze laboratorního výzkumu, a to i vzhledem k organizačním a technologickým změnám v rámci společnosti Sedlecký kaolín, a.s., bylo rozhodnuto, že vývoj lehčených vápenopucolánových malt bude, alespoň v rámci této diplomové práce, probíhat za využití „klasických“ komerčních metakaolínů a s jiným typem lehčiva. Tomuto testování odpovídají pak třetí a čtvrtá etapa laboratorních prací:

- Ve třetí etapě proběhlo testování nevylehčených vápenopucolánových malt, v nichž bylo 15%, 30% a 50% hmotnosti vápenného hydrátu nahrazeno metakaolínem N-META 2 a I-META 4. Cílem bylo ověřit vliv obou typů metakaolínů na zlepšení funkčních parametrů malt a zjištění optimálního množství metakaolínu v maltě.
- Pro čtvrtou fázi pak byl následně zvolen optimální poměr mezi vápenným hydrátem a metakaolínem v poměru 1:1. Zároveň byly malty vylehčovány, a to náhradou 25, 50, 75 a 100% křemenného písku expandovaným perlitem. Výsledky této stěžejní fáze výzkumu jsou detailně popsány v podkap. 5.5.

5. Zkoušení materiálových vlastností

Tato kapitola diplomové práce se věnuje popisu přípravy zkušebních těles pro provedení zkoušek mechanických a fyzikálních vlastností zatvrdlých vápenných malt modifikovaných metakaolínem. V následných podkapitolách je stručně popsán postup při provádění zkoušek. Hlavní část kapitoly je věnována prezentování výsledků jednotlivých zkoušek.

Proces zkoušení byl rozdělen na čtyři fáze, kdy v každé fázi došlo ke změně parametrů vstupních materiálů, případně celkové změně složení záměsi vápenné malty.

5.1. Popis přípravy zkušebních těles a zkoušek materiálových vlastností

Na jednotlivých tělesech byly provedeny zkoušky v tahu za ohybu, tlaku, zkouška mrazuvzdornosti a zjištění tepelné vodivosti malty. Zkoušky byly prováděny po 7,14 a 28 dnech, v některých případech také dle potřeby po 21 a 56 dnech. Ve všech případech byla také stanovena objemová hmotnost zatvrdlé malty dle normy ČSN EN 1015-10 [5]. Při přípravě zkušebních těles byla stanovena konzistence čerstvé malty, na jejímž základě bylo použito potřebné množství vody.

5.1.1 Příprava zkušebních těles

Pro zkoušení mechanických a trvanlivostních vlastností byla připravena zkušební tělesa dle normy ČSN EN 1015-2 [3]. Připraveny byly zkušební trámečky o rozměru 40x40x160mm. Záměs byla tvořena 450±2g vápenného hydrátu, 1350±5g normovaného písku plynulé granulometrie a množství vody stanovené na základě zkoušky konzistence. Malty byly ve všech čtyřech fázích modifikovány různým množstvím metakaolínu. Pro každou zkušební metodu byla vyrobena 3 tělesa. Po odformování byla zkušební tělesa ponechána ke zrání na vzduchu v laboratorních podmínkách.

5.1.2 Stanovení konzistence rozlitím

Stanovení konzistence čerstvé malty bylo provedeno na střešacím stolku (Obr. 6.) dle normy ČSN EN 1015-3 [4]. Při této metodě se měří rozlití malého kužele vytvořeného z čerstvé malty pomocí rázů střešacího stolku. Při rozlití vznikne koláč, u nějž se ve dvou

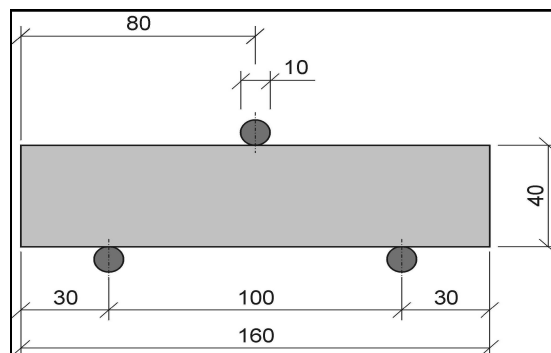
směrech změří průměr. Z této zkušební metody je navrženo množství vody pro přípravu zkušebních těles. V této práci byly všechny záměsi připravovány na konstantní hodnotu rozliti $175 \pm 5 \text{ mm}$.



Obr. 6. Střásací stolek

5.1.3 Pevnost v tahu za ohybu

Zkušební trámeček vyrobený podle postupu pospaného v podkap. 5.1.1. se umístí kolmo na směr plnění do zkušebního lisu (Obr. 7.). Trámeček je zatěžován plynule narůstající silou až do porušení. Poloviny trámečků jsou uchovány pro zkoušku pevnosti v tlaku. Podrobný popis zkoušky je uveden v normě ČSN EN 1015-11[6].



Obr. 7. Rozložení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

5.1.4 Pevnost v tlaku

Zlomky trámečků po zkoušce v pevnosti v tahu za ohybu jsou zkoušeny na pevnost v tlaku. Jednotlivé zlomky jsou umísťovány do zkušebního lisu a plynulou silou zatěžovány až do porušení (Obr. 8.). Podrobný popis postupu zkoušky je možno nalézt v normě ČSN EN 1015-11 [6].



Obr. 8. Rozložení zkoušky pevnosti v tlaku

5.1.5 Stanovení mrazuvzdornosti

Zkouška mrazuvzdornosti probíhá na stejných zkušebních tělesech jako pevnostní zkoušky. Tělesa jsou po 28 dnech zrání umístěna do zmrazovací skříně. Na tělesech poté probíhají zmrazovací cykly, kdy se na vzduchu zmrazují na teplotu -15°C a rozmrazují ve vodě na teplotu 20°C . Zkušební postup a délka jednotlivých cyklů je popsána v normě ČSN 72 2452 [7]. Vzhledem k neznalosti odolnosti jednotlivých vzorků, bylo cyklování přerušováno z počátku po jednom cyklu a později po dvou a čtyřech cyklech kvůli kontrole vzorků.

5.1.6 Stanovení součinitel tepelné vodivosti

U vybraných vzorků byla stanovena tepelná vodivost λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Tato fyzikální veličina byla stanovena na externím pracovišti (ÚGN AV ČR, v.v.i. v Ostravě) pomocí přístroje Isomet 2104 (Obr. 9.). Měření bylo provedeno na předem připravených vzorcích tvaru válečku o přibližném průměru 10 cm a přibližně stejné výšce.



Obr. 9. Isomet 2104 pro stanovení tepelná vodivosti

5.2. První fáze – zkoušení vlastností vápenných malt modifikovaných lehčeným metakaolínem

Pro tuto fázi byl použit dříve popsáný lehčený metakaolín. Jednotlivé záměsi byly modifikovány 15 a 30% náhradou hmotnosti vápenného hydrátu. Na připravených tělesech byly provedeny zkoušky popsané v kapitolách 5.1.1-5.1.4. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v následujících tabulkách a jsou také graficky znázorněny (Tab. 11-20, Obr. 10-15).

Zkouška rozlití

Tab. 11. Hodnota rozlití čerstvé malty na střešacím stolku

	Hydrát	SIa + buk	SIa + smrk	SIa + mittal	OSR + buk	OSR + smrk	OSR + mittal
Voda [g]	430	430	430	430	430	430	430
Rozlití [mm]	173	178	175	174	176	177	178

Poznámka:

Pro tabulky Tab. 11 – 35 z kapitoly 5.2. a 5.3. znamená:

Hydrát – vápenná malta s pouze s vápenným hydrátem

SIa + buk – vápenná malta s vápenným hydrátem a 15% nebo 30% (viz tabulky) lehčeného metakaolínu vyrobeného z kaolínu Sedlec Ia a bukových pilin

SIa + smrk – vápenná malta s vápenným hydrátem a 15% nebo 30% (viz tabulky) lehčeného metakaolínu vyrobeného z kaolínu Sedlec Ia a smrkových pilin

SIa + mittal – vápenná malta s vápenným hydrátem a 15% nebo 30% (viz tabulky) lehčeného metakaolínu vyrobeného z kaolínu Sedlec Ia a popílku z Arcelor Mittalu

OSR + buk – vápenná malta s vápenným hydrátem a 15% nebo 30% (viz tabulky) lehčeného metakaolínu vyrobeného z jílu OSR a bukových pilin

OSR + smrk – vápenná malta s vápenným hydrátem a 15% nebo 30% (viz tabulky) lehčeného metakaolínu vyrobeného z jílu OSR a smrkových pilin

OSR + mittal – vápenná malta s vápenným hydrátem a 15% nebo 30% (viz tabulky) lehčeného metakaolínu vyrobeného z jílu OSR a popílku z Arcelor Mittalu

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tab. 12. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

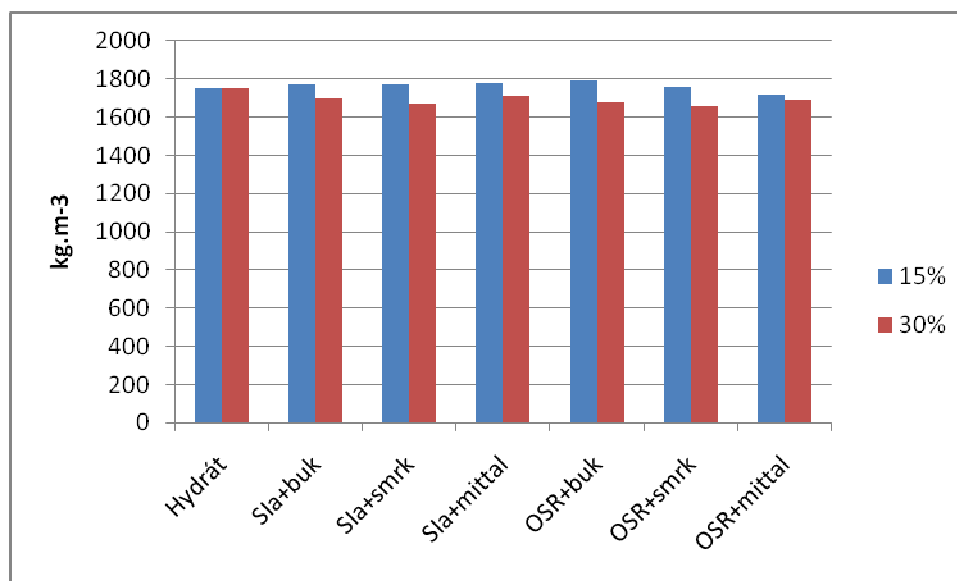
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
Hydrát	0%	1	1754	1750	0	0
		2	1778		0	
		3	1734		0	
SIa+buk	15%	1	1782	1770	0	0
		2	1767		0	
		3	1755		0	
SIa+smrk	15%	1	1755	1770	0	0,1
		2	1763		0,3	
		3	1788		0	
SIa+mittal	15%	1	1748	1780	0	0
		2	1783		0	
		3	1815		0	
OSR+buk	15%	1	1799	1790	0	0
		2	1786		0	
		3	1792		0	
OSR+smrk	15%	1	1768	1760	0	0,1
		2	1797		0	
		3	1699		0,3	
OSR+mittal	15%	1	1712	1720	0,3	0,2
		2	1740		0	
		3	1712		0,3	

Tab. 13. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

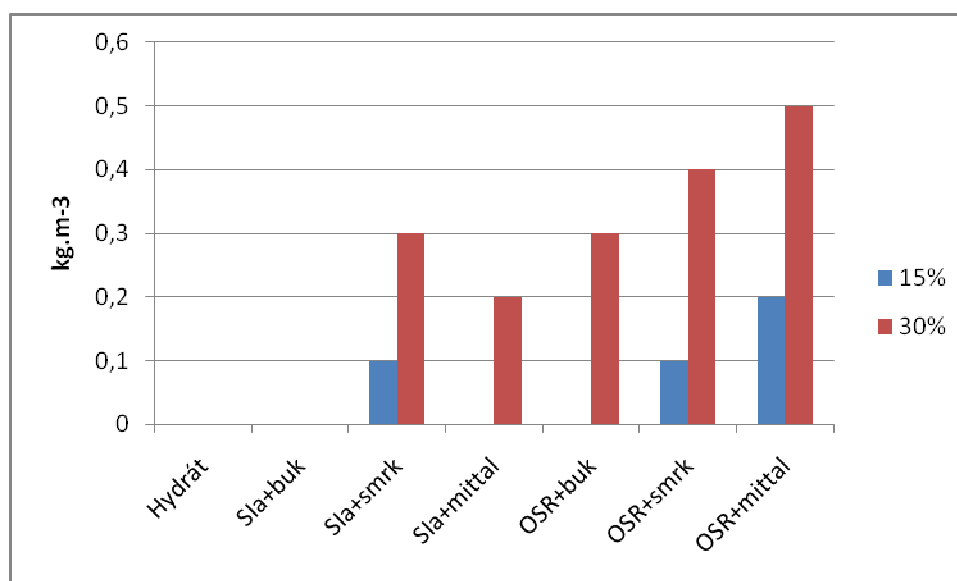
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
Hydrát	0%	1	1754	1750	0	0
		2	1778		0	
		3	1734		0	
SIa+buk	30%	1	1711	1700	0	0
		2	1674		0	
		3	1707		0	
SIa+smrk	30%	1	1667	1670	0,3	0,3
		2	1680		0,3	
		3	1675		0,3	
SIa+mittal	30%	1	1717	1710	0,3	0,2
		2	1707		0,3	
		3	1699		0	
OSR+buk	30%	1	1681	1680	0,3	0,3
		2	1675		0,3	
		3	1697		0,4	

Tab. 13. - Pokračování

OSR+smrk	30%	1	1676	1660	0,4	0,4
		2	1672		0,3	
		3	1640		0,4	
OSR+mittal	30%	1	1713	1690	0,4	0,5
		2	1667		0,5	
		3	1685		0,5	



Obr. 10. Objemová hmotnost vzorků po 14 dnech



Obr. 11. Pevnosti v tahu za ohybu po 14 dnech

Tab. 14. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

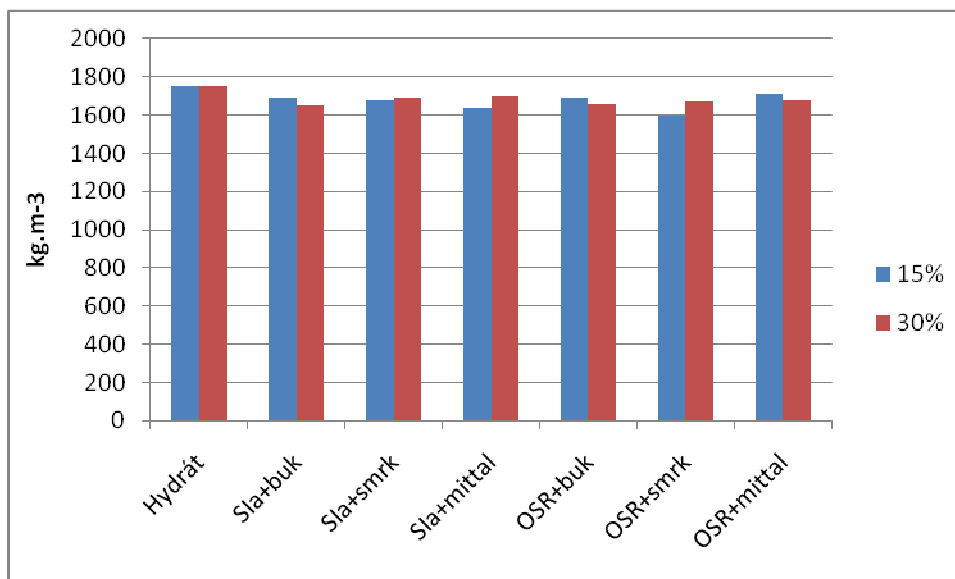
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
Hydrát	0%	1	1724	1750	0	0,1
		2	1722		0	
		3	1781		0,3	
SIa+buk	15%	1	1701	1690	0,5	0,3
		2	1693		0,3	
		3	1688		0	
SIa+smrk	15%	1	1692	1680	0,4	0,2
		2	1680		0,3	
		3	1676		0	
SIa+mittal	15%	1	1626	1640	0,3	0,2
		2	1650		0,4	
		3	1645		0	
OSR+buk	15%	1	1684	1690	0	0,1
		2	1692		0,3	
		3	1680		0	
OSR+smrk	15%	1	1581	1600	0	0,1
		2	1577		0	
		3	1629		0,3	
OSR+mittal	15%	1	1715	1710	0,3	0,3
		2	1705		0,3	
		3	1711		0,3	

Tab. 15. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

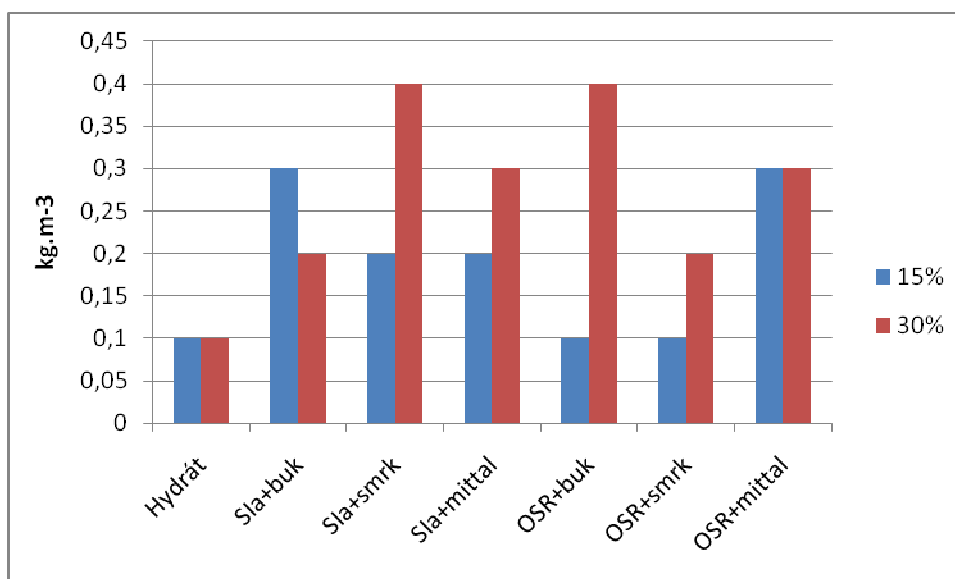
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
Hydrát	0%	1	1754	1750	0	0,1
		2	1778		0	
		3	1734		0,3	
SIa+buk	30%	1	1642	1650	0,3	0,2
		2	1647		0,3	
		3	1651		0	
SIa+smrk	30%	1	1671	1690	0,3	0,4
		2	1725		0,4	
		3	1675		0,4	
SIa+mittal	30%	1	1713	1700	0,3	0,3
		2	1692		0,3	
		3	1707		0,3	
OSR+buk	30%	1	1653	1660	0,4	0,4
		2	1658		0,4	
		3	1659		0,3	

Tab. 15. - Pokračování

OSR+smrk	30%	1	1658	1670	0	0,2
		2	1652		0,6	
		3	1702		0	
OSR+mittal	30%	1	1688	1680	0,3	0,3
		2	1696		0,3	
		3	1663		0,3	



Obr. 12. Objemová hmotnost po 28 dnech



Obr. 13. Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech

Zkouška pevnosti v tlaku

Tab. 16. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 21 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Hydrát	0%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-2	0	
		3-2	0	
SIa+buk	15%	1-1	1,4	0,5
		1-2	1,5	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
SIa+smrk	15%	1-1	1,5	0,7
		1-2	1,5	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	1,1	
		3-2	0	
SIa+mittal	15%	1-1	1,0	0,7
		1-2	1,0	
		2-1	1,0	
		2-2	1,0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+buk	15%	1-1	1,0	0,3
		1-2	1,0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+smrk	15%	1-1	1,1	0,9
		1-2	1,2	
		2-1	1,2	
		2-2	1,1	
		3-1	0	
		3-2	1,1	
OSR+mittal	15%	1-1	0	0,8
		1-2	0	
		2-1	1,0	
		2-2	1,1	
		3-1	1,2	
		3-2	1,2	

Tab. 17. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 21 dnech

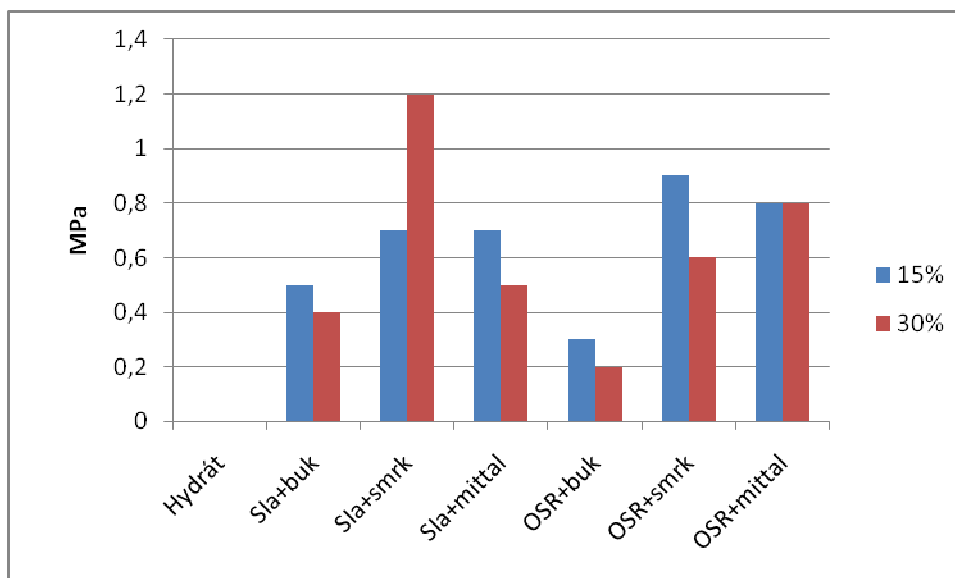
Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Hydrát	0%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-2	0	
		3-2	0	
SIa+buk	30%	1-1	1,0	0,4
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	1,1	
SIa+smrk	30%	1-1	1,2	1,2
		1-2	1,3	
		2-1	1,3	
		2-2	1,1	
		3-1	1,2	
		3-2	1,1	
SIa+mittal	30%	1-1	0	0,5
		1-2	0	
		2-1	1,3	
		2-2	1,4	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+buk	30%	1-1	0	0,2
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	1,2	
		3-2	0	
OSR+smrk	30%	1-1	0	0,6
		1-2	0	
		2-1	2,2	
		2-2	1,4	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+mittal	30%	1-1	1,2	0,8
		1-2	1,3	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 18. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

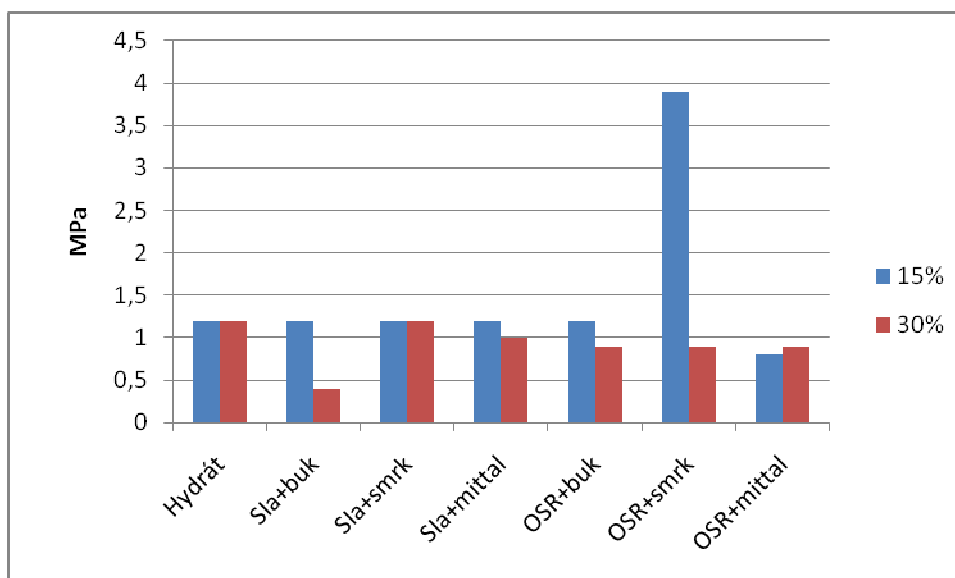
Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Hydrát	0%	1-1	1,4	1,2
		1-2	1,4	
		2-1	1,4	
		2-2	1,5	
		3-2	1,5	
		3-2	0	
S1a+buk	15%	1-1	1,0	1,2
		1-2	1,3	
		2-1	1,3	
		2-2	1,1	
		3-1	1,1	
		3-2	1,1	
S1a+smrk	15%	1-1	1,3	1,2
		1-2	1,3	
		2-1	1,1	
		2-2	1,1	
		3-1	1,1	
		3-2	1,1	
S1a+mittal	15%	1-1	1,2	1,2
		1-2	1,3	
		2-1	1,1	
		2-2	1,1	
		3-1	1,2	
		3-2	1,3	
OSR+buk	15%	1-1	1,1	1,2
		1-2	1,1	
		2-1	1,2	
		2-2	1,3	
		3-1	1,1	
		3-2	1,1	
OSR+smrk	15%	1-1	3,2	3,9
		1-2	3,4	
		2-1	4,5	
		2-2	4,5	
		3-1	3,9	
		3-2	4,0	
OSR+mittal	15%	1-1	0	0,8
		1-2	0	
		2-1	1,1	
		2-2	1,1	
		3-1	1,4	
		3-2	1,3	

Tab. 19. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Hydrát	0%	1-1	1,4	1,2
		1-2	1,4	
		2-1	1,4	
		2-2	1,5	
		3-2	1,5	
		3-2	0	
SIa+buk	30%	1-1	0	0,4
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	1,2	
		3-2	1,2	
SIa+smrk	30%	1-1	1,1	1,2
		1-2	1,0	
		2-1	1,3	
		2-2	1,3	
		3-1	1,1	
		3-2	1,1	
SIa+mittal	30%	1-1	1,2	1,0
		1-2	1,2	
		2-1	1,0	
		2-2	1,4	
		3-1	1,2	
		3-2	0	
OSR+buk	30%	1-1	1,1	0,9
		1-2	0	
		2-1	1,1	
		2-2	1,2	
		3-1	1,2	
		3-2	1,0	
OSR+smrk	30%	1-1	1,1	0,9
		1-2	1,2	
		2-1	1,1	
		2-2	1,1	
		3-1	0	
		3-2	1,1	
OSR+mittal	30%	1-1	1,1	0,9
		1-2	1,1	
		2-1	0	
		2-2	1,1	
		3-1	1,1	
		3-2	1	



Obr. 14. Pevnost v tlaku po 21 dnech



Obr. 15. Pevnost v tlaku po 28 dnech

Zkouška mrazuvzdornosti

Tab. 20. Počet zmrazovacích cyklů, kterým tělesa odolaly

	Hydrát	Sla + buk	Sla + smrk	Sla + mittal	OSR + buk	OSR + smrk	OSR + mittal
Rozpad	3 cykly	3 cykly	3 cykly	3 cykly	3 cykly	3 cykly	3 cykly

5.3. Druhá fáze – zkoušení vápenných malt modifikovaných lehčeným metakaolínem zjemněné frakce

Pro tuto fázi byl použit dříve popsáný lehčený metakaolín, avšak s tím rozdílem, že vzhledem k neuspokojivým výsledkům z první fáze byla z jednotlivých metakaolínů odsítována frakce nad 2mm a zbytek byl rozemlet na jemnější zrnitost. Záměsi opět byly modifikovány z 15 a 30%, ale přidaný metakolín byl tvořen 80% přemleté frakce a 20% původního metakaolínu frakce nad 2mm. Opět bylo pomocí zkoušky rozlitím stanoveno potřebné množství vody (Tab. 21.) a na vytvořených tělesech byly provedeny zkoušky mechanických a fyzikálních vlastností. Výsledky jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech (Tab. 22 – 35, Obr. 16 – 23).

Zkouška rozlitím

Tab. 21. Hodnota rozlití čerstvé malty na střešacím stolku

	Hydrát	SIa + buk	SIa + smrk	SIa + mittal	OSR + buk	OSR + smrk	OSR + mittal
Voda [g]	430	390	390	390	390	390	390
Rozlití [mm]	173	171	178	175	178	177	179

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tab. 22. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

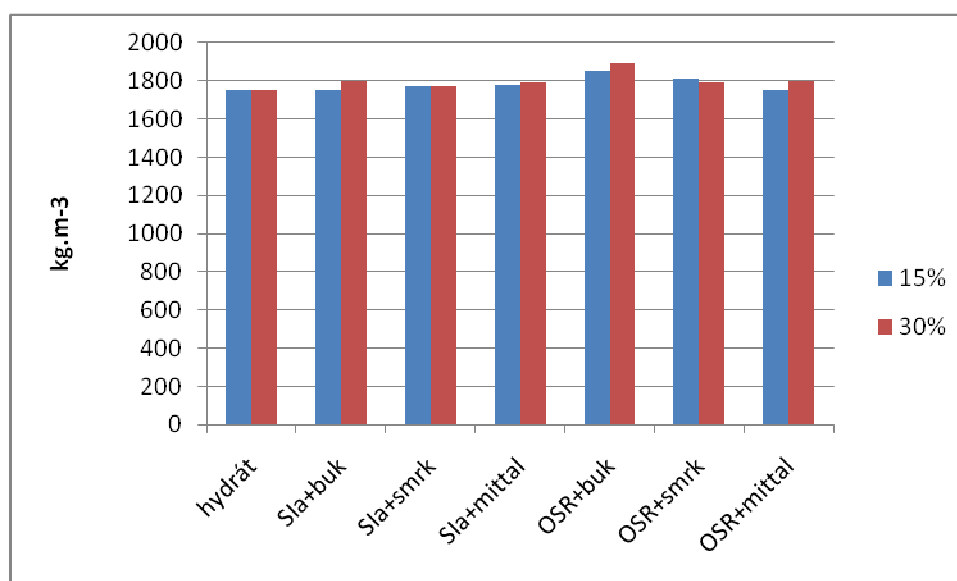
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
SIa+buk	15%	1	1688	1750	0	0
		2	1838		0	
		3	1735		0	
SIa+smrk	15%	1	1737	1770	0,2	0,1
		2	1779		0	
		3	1791		0	
SIa+mittal	15%	1	1741	1780	0,3	0,1
		2	1753		0	
		3	1831		0	
OSR+buk	15%	1	1769	1850	0	0
		2	1904		0	
		3	1881		0	
OSR+smrk	15%	1	1754	1810	0	0
		2	1857		0	
		3	1822		0	

Tab. 22. - Pokračování

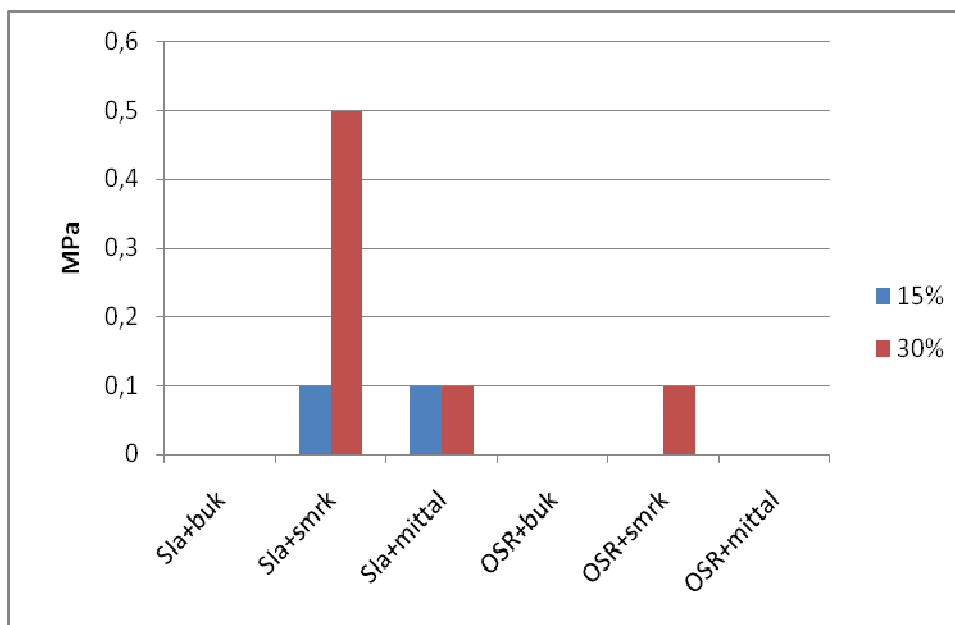
OSR+mittal	15%	1	1688	1750	0	0
		2	1838		0	
		3	1735		0	

Tab. 23. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
SIa+buk	30%	1	1787	1800	0	0
		2	1803		0	
		3	1806		0	
SIa+smrk	30%	1	1721	1770	0,5	0,5
		2	1766		0,6	
		3	1824		0,5	
SIa+mittal	30%	1	1758	1790	0,4	0,1
		2	1835		0	
		3	1778		0	
OSR+buk	30%	1	1789	1890	0	0
		2	1933		0	
		3	1939		0	
OSR+smrk	30%	1	1760	1790	0,4	0,1
		2	1830		0	
		3	1766		0	
OSR+mittal	30%	1	1787	1800	0	0
		2	1803		0	
		3	1803		0	



Obr. 16. Objemová hmotnost těles po 7 dnech



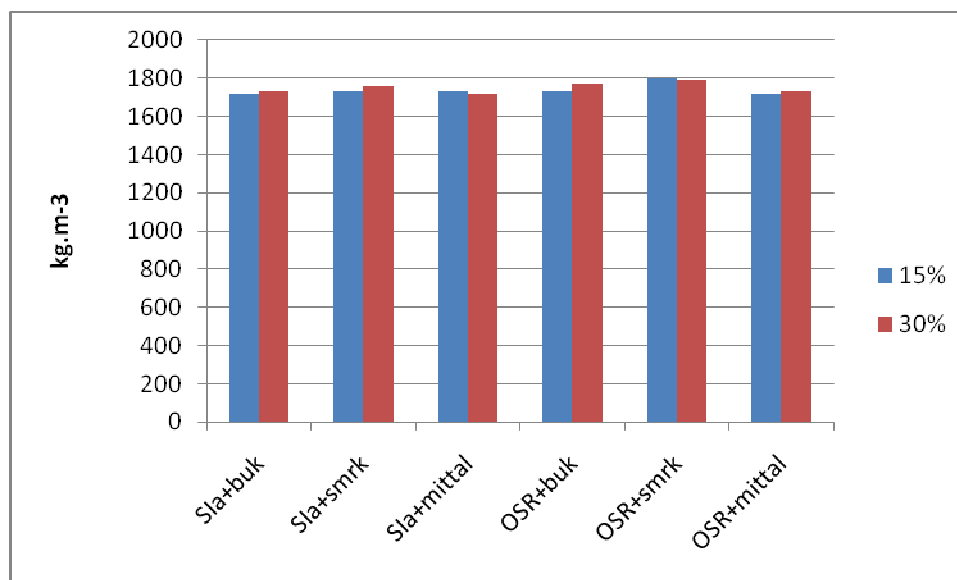
Obr. 17. Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech

Tab. 24. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

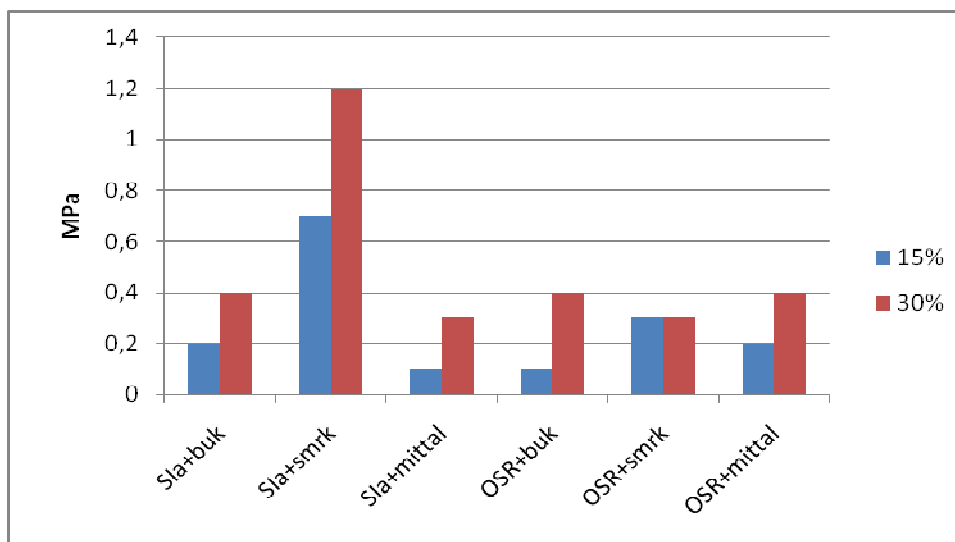
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
SIa+buk	15%	1	1715	1720	0,3	0,2
		2	1739		0	
		3	1698		0,3	
SIa+smrk	15%	1	1725	1730	0,7	0,7
		2	1724		0,6	
		3	1741		0,8	
SIa+mittal	15%	1	1729	1730	0,3	0,1
		2	1722		0	
		3	1734		0	
OSR+buk	15%	1	1738	1730	0,3	0,1
		2	1701		0	
		3	1738		0	
OSR+smrk	15%	1	1788	1800	0,3	0,3
		2	1799		0,3	
		3	1803		0,3	
OSR+mittal	15%	1	1715	1720	0,3	0,2
		2	1739		0	
		3	1698		0,3	

Tab. 25. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
SIa+buk	30%	1	1732	1730	0,3	0,4
		2	1727		0,4	
		3	1726		0,4	
SIa+smrk	30%	1	1705	1760	1,1	1,2
		2	1778		1,3	
		3	1791		1,2	
SIa+mittal	30%	1	1718	1720	0,4	0,3
		2	1718		0,3	
		3	1709		0,3	
OSR+buk	30%	1	1778	1770	0,4	0,4
		2	1744		0,4	
		3	1776		0,4	
OSR+smrk	30%	1	1781	1790	0,3	0,3
		2	1785		0,4	
		3	1801		0,3	
OSR+mittal	30%	1	1732	1730	0,3	0,4
		2	1727		0,4	
		3	1726		0,4	



Obr. 18. Objemová hmotnost těles po 14 dnech



Obr. 19. Pevnost v tahu za ohybu těles po 14 dnech

Tab. 26. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

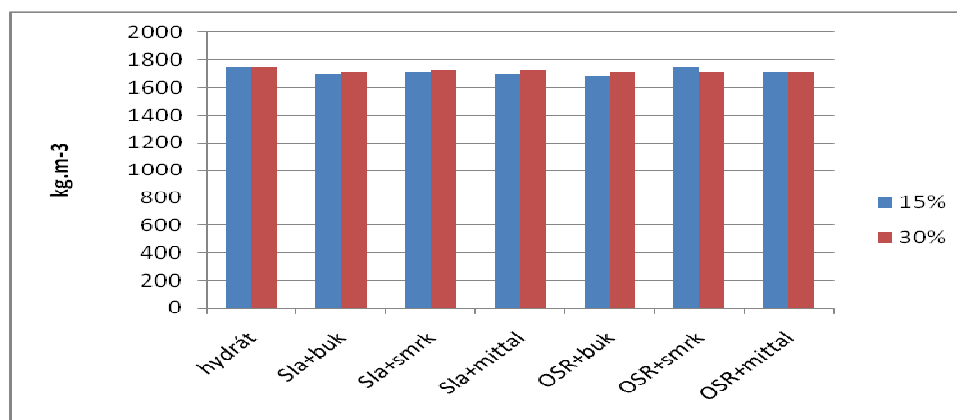
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
SIa+buk	15%	1	1706	1700	0,5	0,4
		2	1687		0,4	
		3	1691		0,3	
SIa+smrk	15%	1	1705	1710	0,9	0,8
		2	1708		0,8	
		3	1727		0,7	
SIa+mittal	15%	1	1692	1700	0,3	0,2
		2	1701		0,3	
		3	1701		0	
OSR+buk	15%	1	1683	1680	0,5	0,3
		2	1693		0	
		3	1667		0,3	
OSR+smrk	15%	1	1784	1750	0,4	0,3
		2	1755		0,3	
		3	1710		0,3	
OSR+mittal	15%	1	1736	1720	0,3	0,3
		2	1710		0,4	
		3	1701		0,3	

Tab. 27. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

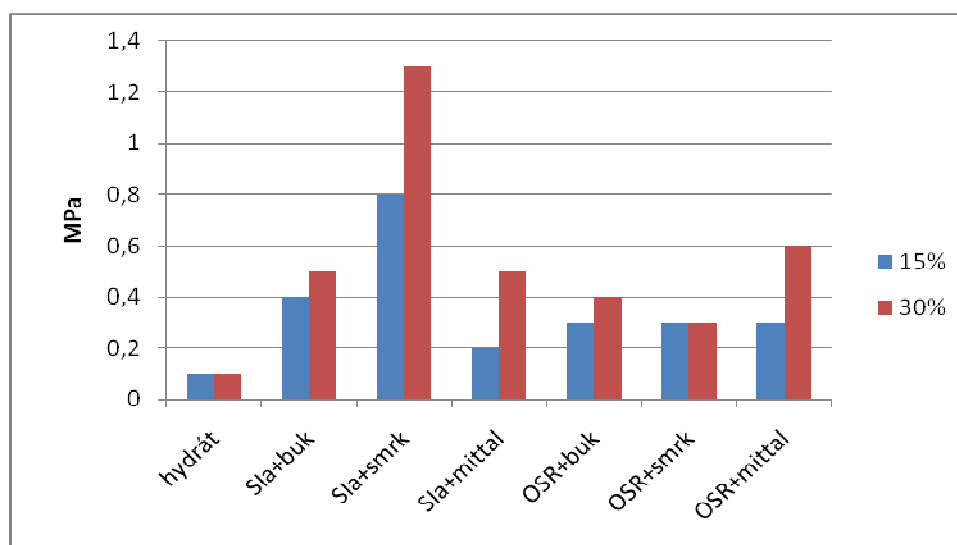
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
SIa+buk	30%	1	1727	1720	0,5	0,5
		2	1730		0,5	
		3	1710		0,5	

Tab. 27. - Pokračování

S1a+smrk	30%	1	1731	1730	1,0	1,25
		2	1727		1,2	
		3	1732		1,4	
S1a+mittal	30%	1	1742	1730	0,5	0,5
		2	1718		0,5	
		3	1725		0,4	
OSR+buk	30%	1	1714	1720	0,4	0,4
		2	1720		0,5	
		3	1717		0,4	
OSR+smrk	30%	1	1718	1720	0,4	0,3
		2	1718		0,3	
		3	1709		0,3	
OSR+mittal	30%	1	1727	1720	0,5	0,6
		2	1724		0,7	
		3	1715		0,5	



Obr. 20. Objemová hmotnost těles po 28 dnech



Obr. 21. Pevnost v tahu za ohybu těles po 28 dnech

Tab. 28. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
SIa+buk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
SIa+smrk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
SIa+mittal	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+buk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+smrk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+mittal	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 29. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
SIa+buk	30%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 29. - Pokračování

Sla+smrk	30%	1-1	1,8	1,8
		1-2	1,7	
		2-1	1,7	
		2-2	2,0	
		3-1	1,6	
		3-2	1,7	
Sla+mittal	30%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+buk	30%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+smrk	30%	1-1	1,0	0,2
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+mittal	30%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 30. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Sla+buk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
Sla+smrk	15%	1-1	1,6	1,9
		1-2	1,6	
		2-1	2,0	
		2-2	1,9	
		3-1	2,1	
		3-2	2,1	

Tab. 30. - Pokračování

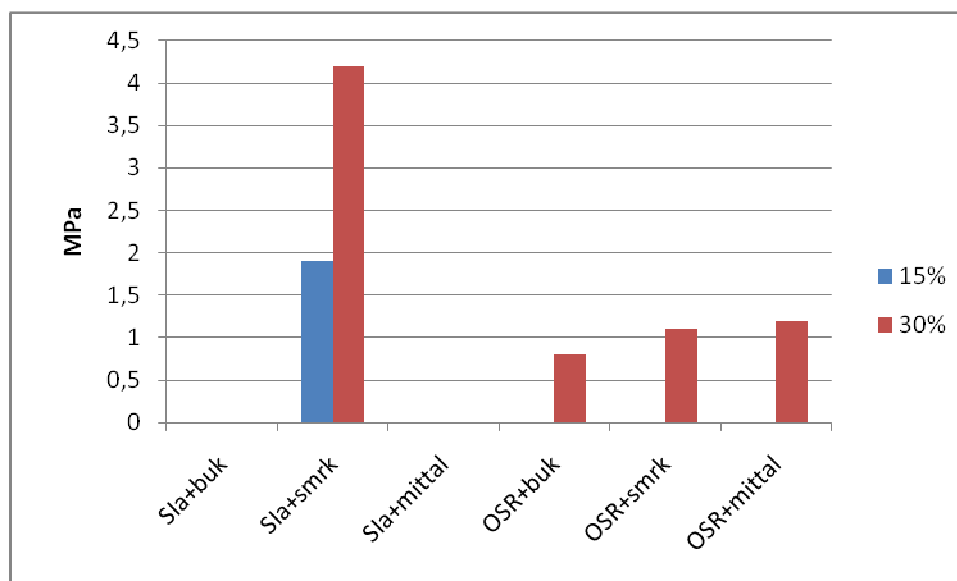
SIa+mittal	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+buk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+smrk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+mittal	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 31. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
SIa+buk	30%	1-1	1,0	0
		1-2	1,0	
		2-1	1,1	
		2-2	1,1	
		3-1	1,4	
		3-2	1,3	
SIa+smrk	30%	1-1	3,2	4,2
		1-2	3,2	
		2-1	5,2	
		2-2	4,8	
		3-1	4,4	
		3-2	4,4	
SIa+mittal	30%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 31. - Pokračování

OSR+buk	30%	1-1	1,2	0,8
		1-2	1,2	
		2-1	1,1	
		2-2	1,2	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+smrk	30%	1-1	1,1	1,1
		1-2	1,1	
		2-1	1,0	
		2-2	1,0	
		3-1	1,1	
		3-2	1,1	
OSR+mittal	30%	1-1	1,0	1,2
		1-2	1,0	
		2-1	1,1	
		2-2	1,1	
		3-1	1,4	
		3-2	1,3	



Obr. 22. Pevnost v tlaku těles po 14 dnech

Tab. 32. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R_c [MPa]	R_{cpr} [MPa]
Sla+buk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 32. - Pokračování

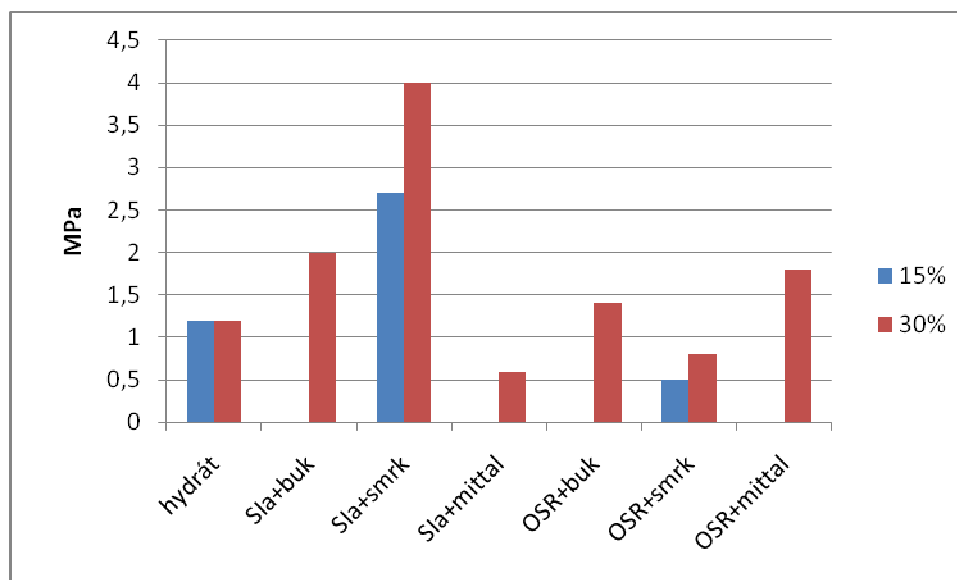
Sla+smrk	15%	1-1	2,8	2,7
		1-2	2,8	
		2-1	2,7	
		2-2	2,8	
		3-1	2,5	
		3-2	2,5	
Sla+mittal	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+buk	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	
OSR+smrk	15%	1-1	1,1	0,5
		1-2	1,1	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	1,0	
		3-2	0	
OSR+mittal	15%	1-1	0	0
		1-2	0	
		2-1	0	
		2-2	0	
		3-1	0	
		3-2	0	

Tab. 33. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Sla+buk	30%	1-1	1,5	2,0
		1-2	1,5	
		2-1	2,6	
		2-2	2,4	
		3-1	2,1	
		3-2	2,0	
Sla+smrk	30%	1-1	2,9	4,0
		1-2	4,3	
		2-1	4,5	
		2-2	5,3	
		3-1	3,7	
		3-2	3,2	

Tab. 33. - Pokračování

Sla+mittal	30%	1-1	1,1	0,6
		1-2	0	
		2-1	1,5	
		2-2	0	
		3-1	1,2	
		3-2	0	
OSR+buk	30%	1-1	1,1	1,4
		1-2	1,2	
		2-1	1,6	
		2-2	1,6	
		3-1	1,5	
		3-2	1,4	
OSR+smrk	30%	1-1	1,0	0,8
		1-2	0	
		2-1	1,1	
		2-2	0	
		3-1	1,4	
		3-2	1,3	
OSR+mittal	30%	1-1	1,5	1,8
		1-2	1,6	
		2-1	1,9	
		2-2	2,1	
		3-1	1,8	
		3-2	1,8	



Obr. 23. Pevnost v tlaku těles po 28 dnech

Zkouška mrazuvzdornosti

Tab. 34. Počet zmrazovacích cyklů u těles s 15% modifikací MK

	Hydrát	SIa + 15% buk	SIa + 15%smrk	SIa + 15%mittal	OSR + 15%buk	OSR + 15%smrk	OSR + 15%mittal
Rozpad*	3 cykly	2 cykly		2 cykly			
Naprostý rozpad**			8 cyklů		4 cykly	4 cykly	4 cykly

Tab. 35. Počet zmrazovacích cyklů u těles s 30% modifikací MK

	Hydrát	SIa + 30% buk	SIa + 30%smrk	SIa + 30%mittal	OSR + 30%buk	OSR + 30%smrk	OSR + 30%mittal
Rozpad*	3 cykly		10 cyklů	4 cykly			4 cykly
Naprostý rozpad**		8 cyklů			4 cykly	4 cykly	

* trhlina na plochách, cca 30% rozpad, po dalším cyklu by nastal „naprostý rozpad“

**výrazný rozpad těles na nesoudržnou hmotu

5.4. Třetí fáze – zkoušení vápenných malt modifikovaných komerčními metakaolíny

Vzhledem k neuspokojivým výsledkům z prvních dvou fází, byla snaha o vylepšení vápenných malt nasměrována k využití komerčních metakaolínu. V případě prokázání příznivého působení, se v další fázi bude hledat alternativa pro vylehčení malt. Pro přípravu malt byly vybrány komerční metakaolíny I-META 4 a N-META 2 vyráběné společností Sedlecký kaolín a.s. Vápenné malty byly modifikovány 15, 30 a 50% pomocí těchto metakaolínů. U jednotlivých záměsí byly stanoveny mechanické a fyzikální vlastnosti. Výsledky zkoušek jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech (Tab. 37 – 43, Obr. 24-29.).

Zkouška rozlívání

Tab. 36. Hodnota rozlívání čerstvé malty na střešacím stolku

	I-META 15	I-META 30	I-META 50	N-META 15	N-META 30	N-META 50
Voda [g]	405	410	430	410	410	430
Rozlívání [mm]	175	178	175	178	175	177

Poznámka:

Pro tabulky Tab. 37 – 43. Kapitoly 5.4. znamená:

I-META 15 – vápenná malta s 15% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem I-META 4

I-META 30 – vápenná malta s 30% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem I-META 4

I-META 50 – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem I-META 4

N-META 15 – vápenná malta s 15% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem N-META 2

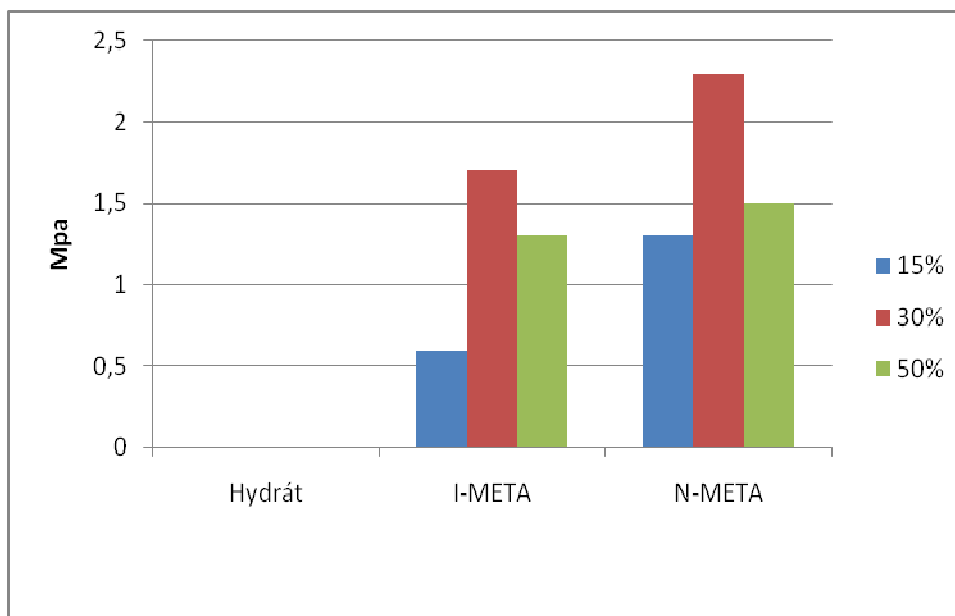
N-META 30 – vápenná malta s 30% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem N-META 2

N-META 50 – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem N-META 2

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tab. 37. Pevnosti v tahu za ohybu těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

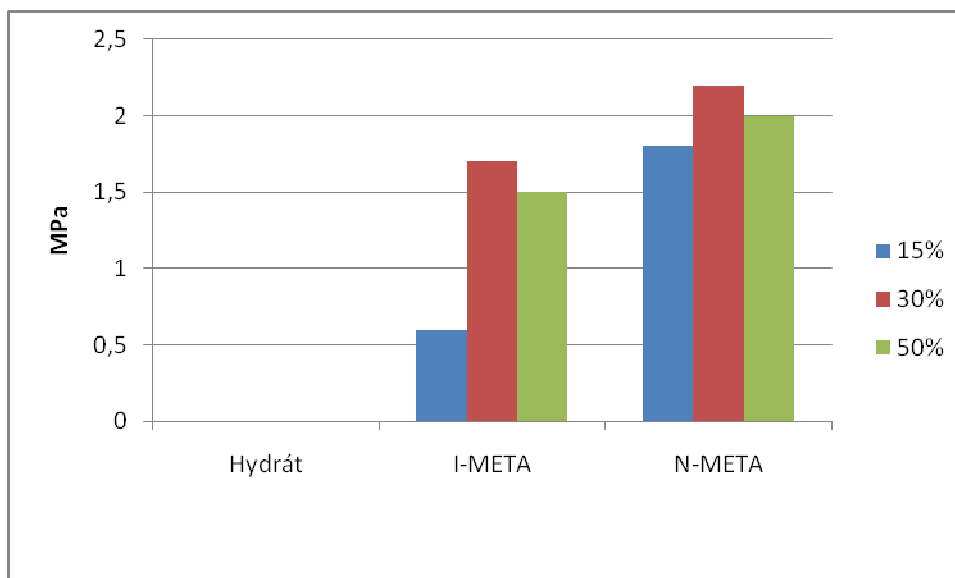
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META 15	15%	1	1736	1790	0,7	0,6
		2	1773		0,6	
		3	1851		0,5	
I-META 30	30%	1	1758	1830	1,3	1,7
		2	1878		1,4	
		3	1853		1,3	
I-META 50	50%	1	1749	1790	1,1	1,3
		2	1815		1,5	
		3	1808		1,3	
N-META 15	15%	1	1747	1800	1,4	1,3
		2	1814		1,4	
		3	1839		1,1	
N-META 30	30%	1	1784	1840	2,2	2,3
		2	1868		2,4	
		3	1881		2,3	
N-META 50	50%	1	1762	1800	1,4	1,5
		2	1826		1,7	
		3	1816		1,5	



Obr. 24. Pevnost v tahu za ohybu těles po 7 dnech

Tab. 38. Pevnosti v tahu za ohybu těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 14 dnech

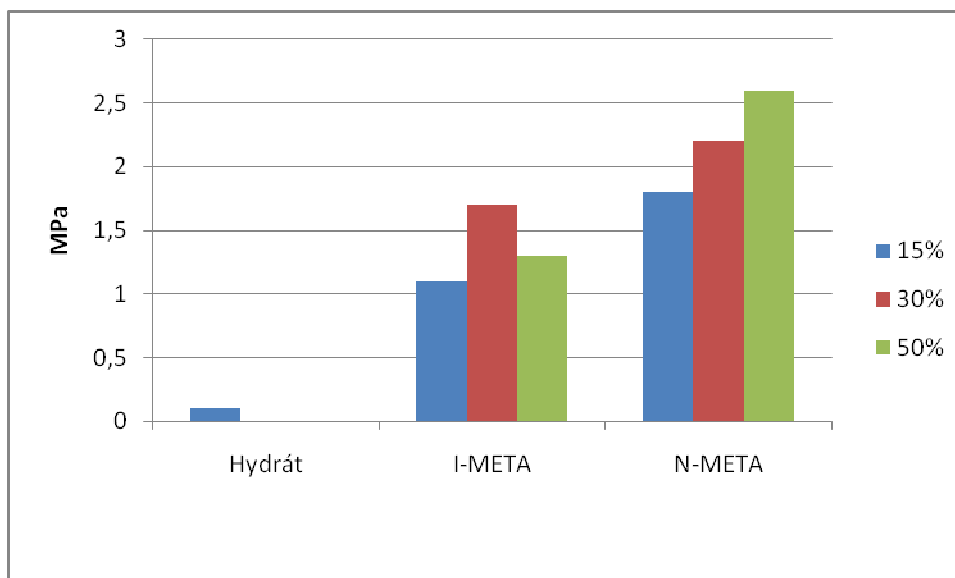
Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META 15	15%	1	1731	1770	0,7	0,6
		2	1775		0,6	
		3	1802		0,5	
I-META 30	30%	1	1753	1770	1,7	1,7
		2	1793		1,8	
		3	1750		1,8	
I-META 50	50%	1	1706	1760	1,5	1,5
		2	1823		1,8	
		3	1759		1,3	
N-META 15	15%	1	1743	1790	1,8	1,8
		2	1849		1,8	
		3	1782		1,7	
N-META 30	30%	1	1791	1810	2,0	2,2
		2	1835		2,1	
		3	1802		2,5	
N-META 50	50%	1	1711	1760	2,0	2,0
		2	1816		2,2	
		3	1750		1,9	



Obr. 25. Pevnost v tahu za ohybu těles po 14 dnech

Tab. 39. Pevnosti v tahu za ohybu těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META 15	15%	1	1695	1720	0,8	1,1
		2	1729		1,3	
		3	1745		1,1	
I-META 30	30%	1	1737	1730	1,2	1,7
		2	1736		1,9	
		3	1707		2,0	
I-META 50	50%	1	1720	1720	0,9	1,3
		2	1739		1,7	
		3	1696		1,2	
N-META 15	15%	1	1748	1750	1,6	1,8
		2	1749		2,0	
		3	1743		1,7	
N-META 30	30%	1	1778	1770	1,8	2,2
		2	1753		2,8	
		3	1776		2,0	
N-META 50	50%	1	1691	1730	1,8	2,6
		2	1739		3,0	
		3	1760		3,1	



Obr. 26. Pevnost tahu za ohybu těles po 28 dnech

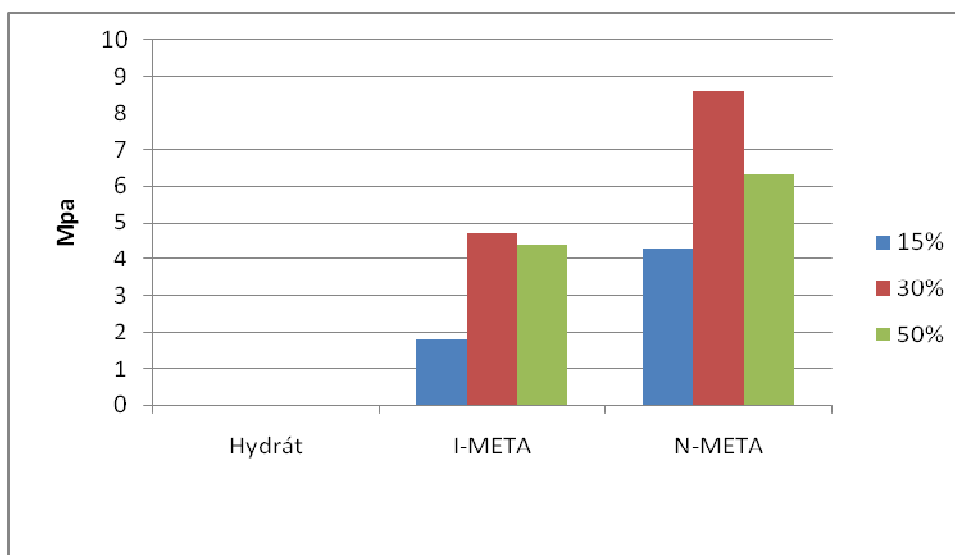
Zkouška pevnosti v tlaku

Tab. 40. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META 15	15%	1-1	2,0	1,8
		1-2	1,9	
		2-1	1,8	
		2-2	1,8	
		3-1	1,6	
		3-2	1,6	
I-META 30	30%	1-1	4,3	4,7
		1-2	4,3	
		2-1	4,6	
		2-2	4,8	
		3-1	4,6	
		3-2	4,7	
I-META 50	50%	1-1	4,0	4,4
		1-2	4,1	
		2-1	4,2	
		2-2	4,8	
		3-1	4,7	
		3-2	4,7	
N-META 15	15%	1-1	4,3	4,3
		1-2	4,4	
		2-1	4,4	
		2-2	4,5	
		3-1	4,1	
		3-2	4,3	

Tab. 40. - Pokračování

N-META 30	30%	1-1	8,3	8,6
		1-2	7,3	
		2-1	9,1	
		2-2	8,9	
		3-1	9,1	
		3-2	9,1	
N-META 50	50%	1-1	6,0	6,3
		1-2	6,2	
		2-1	6,5	
		2-2	6,3	
		3-1	6,2	
		3-2	6,5	



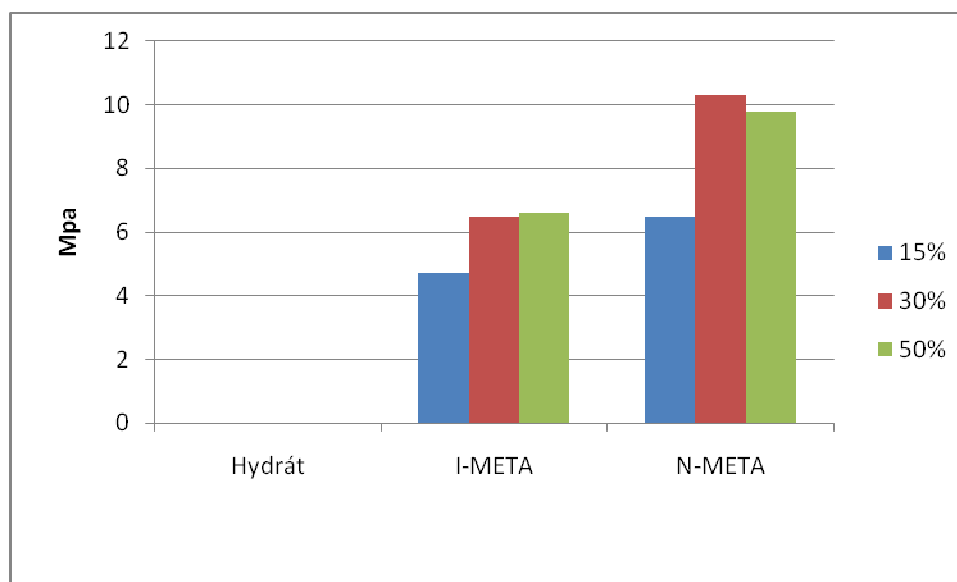
Obr. 27. Pevnost tlaku těles po 7 dnech

Tab. 41. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 14 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META 15	15%	1-1	4,1	4,7
		1-2	4,0	
		2-1	5,1	
		2-2	4,8	
		3-1	4,8	
		3-2	5,1	
I-META 30	30%	1-1	5,7	6,5
		1-2	5,7	
		2-1	7,2	
		2-2	7,1	
		3-1	6,8	
		3-2	6,5	

Tab. 41. - Pokračování

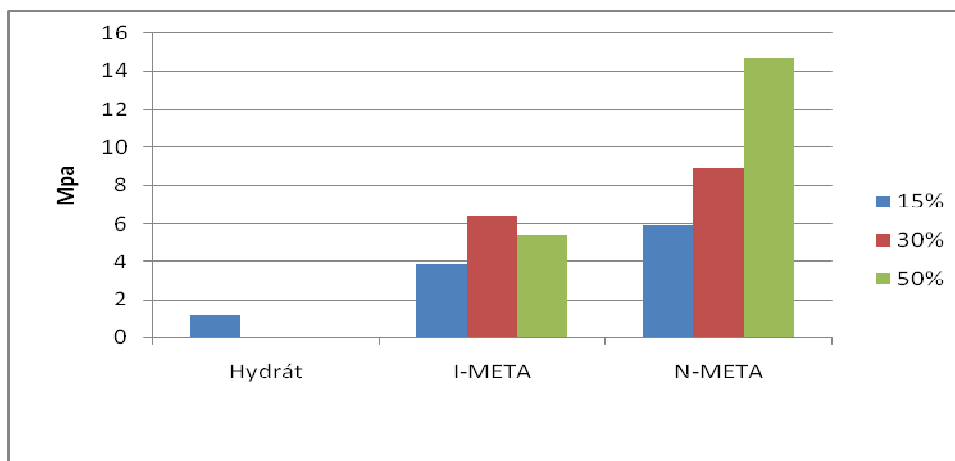
I-META 50	50%	1-1	5,2	6,6
		1-2	5,1	
		2-1	7,7	
		2-2	7,9	
		3-1	7,2	
		3-2	6,4	
N-META 15	15%	1-1	6,2	6,5
		1-2	6,0	
		2-1	6,5	
		2-2	6,6	
		3-1	6,7	
		3-2	6,8	
N-META 30	30%	1-1	9,4	10,3
		1-2	7,9	
		2-1	11,2	
		2-2	10,5	
		3-1	12,0	
		3-2	10,8	
N-META 50	50%	1-1	8,8	9,8
		1-2	8,9	
		2-1	11,1	
		2-2	11,5	
		3-1	9,3	
		3-2	9,3	



Obr. 28. Pevnost v tlaku těles po 14 dnech

Tab. 42. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META 15	15%	1-1	3,2	3,9
		1-2	3,4	
		2-1	4,5	
		2-2	4,5	
		3-1	3,9	
		3-2	4,0	
I-META 30	30%	1-1	4,0	6,4
		1-2	4,0	
		2-1	7,8	
		2-2	7,4	
		3-1	7,6	
		3-2	7,3	
I-META 50	50%	1-1	4,9	5,4
		1-2	3,0	
		2-1	7,1	
		2-2	6,6	
		3-1	6,6	
		3-2	4,1	
N-META 15	15%	1-1	5,1	5,9
		1-2	5,1	
		2-1	6,0	
		2-2	6,2	
		3-1	6,3	
		3-2	6,4	
N-META 30	30%	1-1	7,0	8,9
		1-2	6,6	
		2-1	11,4	
		2-2	11,0	
		3-1	9,0	
		3-2	8,3	
N-META 50	50%	1-1	15,9	14,7
		1-2	14,7	
		2-1	13,5	
		2-2	16,5	
		3-1	13,8	
		3-2	13,8	



Obr. 29. Pevnost v tlaku těles po 28 dnech

Zkouška mrazuvzdornosti

Tab. 43. Počet zmrazovacích cyklů

	I-META 15	I-META 30	I-META 50	N-META 15	N-META 30	N-META 50
Rozpad	11 cyklů	11 cyklů	17 cyklů	15 cyklů	17 cyklů	17 cyklů

5.5. Čtvrtá fáze – zkoušení vápenných malt modifikovaných komerčními metakaolínými s vylehčením pomocí expandovaného perlitu

Ve třetí fázi této práce byly provedeny zkoušky na vápenných maltách modifikovaných komerčními metakaolínými I-META 4 a N-META 2. Tyto zkoušky potvrdily příznivý vliv metakaolínů na vápenné malty. Proto bylo zvoleno jako optimální množství metakaolínu 50% z hmotnosti vápenného hydrátu. V této fázi byla takto připravená směs dále vylehčena náhradou písku expandovaným perlitem. Vylehčení bylo tvořeno 25, 50, 75 a 100% nahrazením písku experlitem. Na připravených vzorcích byly provedeny zkoušky mechanických, trvanlivostních a také tepelně technických vlastností. Výsledky zkoušek jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech (Tab. 44 – 53, Obr. 30 – 36).

Zkouška rozlívání

Tab. 44. Hodnota rozlívání čerstvé malty na střešacím stolku

	I-META +25% exp	I-META +50% exp	I-META +75% exp	I-META +100% exp	N-META + 25% exp	N-META +50% exp	N-META +75% exp	N-META +100% exp
Voda [g]	450	460	475	495	450	460	470	495
Rozlívání [mm]	176	175	172	170	178	174	171	170

Poznámka:

Pro tabulky Tab. 44 – 53. Kapitoly 5.5. znamená:

I-META + 25%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

I-META 4 a 25% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

I-META + 50%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

I-META 4 a 50% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

I-META + 75%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

I-META 4 a 75% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

I-META + 100%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

I-META 4 a 100% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

N-META + 25%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

N-META 2 a 25% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

N-META + 50%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

N-META 2 a 50% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

N-META + 75%exp – vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

N-META 2 a 75% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

N-META + 100%exp – vápenná malta s % náhradou vápenného hydrátu metakaolínem

N-META 2 a 100% náhradou kameniva expandovaným perlitem.

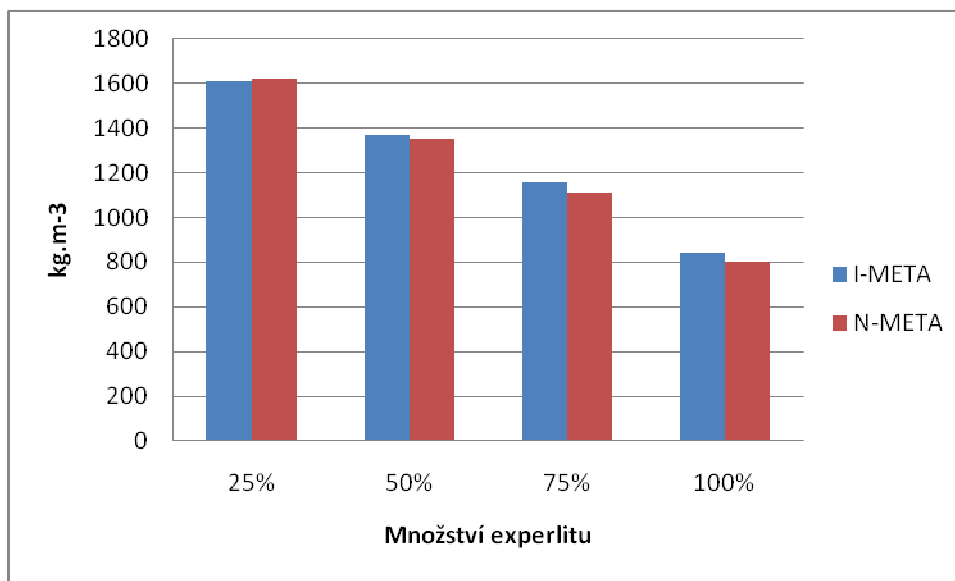
Zkouška v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tab. 45. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 7 dnech

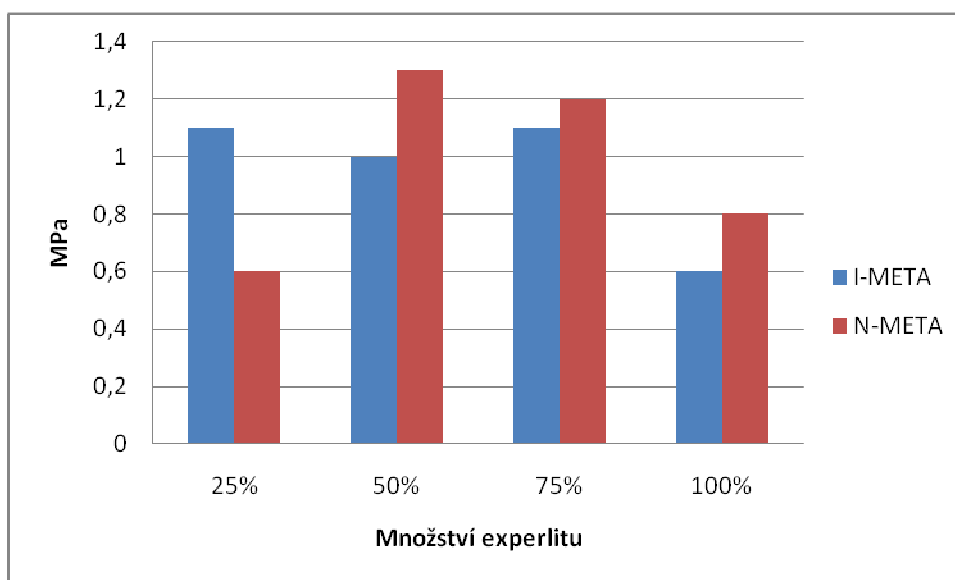
Záměs	Množství experlitu	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. Průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META +25exp	25%	1	1612	1610	1,1	1,1
		2	1615		1,2	
		3	1592		1,1	
I-META +50exp	50%	1	1344	1370	0,8	1,0
		2	1373		1,1	
		3	1395		1,1	
I-META +75exp	75%	1	1129	1160	0,9	1,1
		2	1158		1,1	
		3	1181		1,2	
I-META +100exp	100%	1	869	840	0,7	0,6
		2	854		0,6	
		3	790		0,5	
N-META +25exp	25%	1	1619	1620	1,5	1,3
		2	1628		1,5	
		3	1600		1,4	
N-META +50exp	50%	1	1315	1350	1,2	1,2
		2	1367		1,1	
		3	1367		1,2	

Tab. 45. - Pokračování

N-META +75exp	75%	1	1133	1110	0,9	0,8
		2	1119		0,7	
		3	1078		0,9	
N-META +100exp	100%	1	751	800	0,7	0,8
		2	847		0,1	
		3	806		0,7	



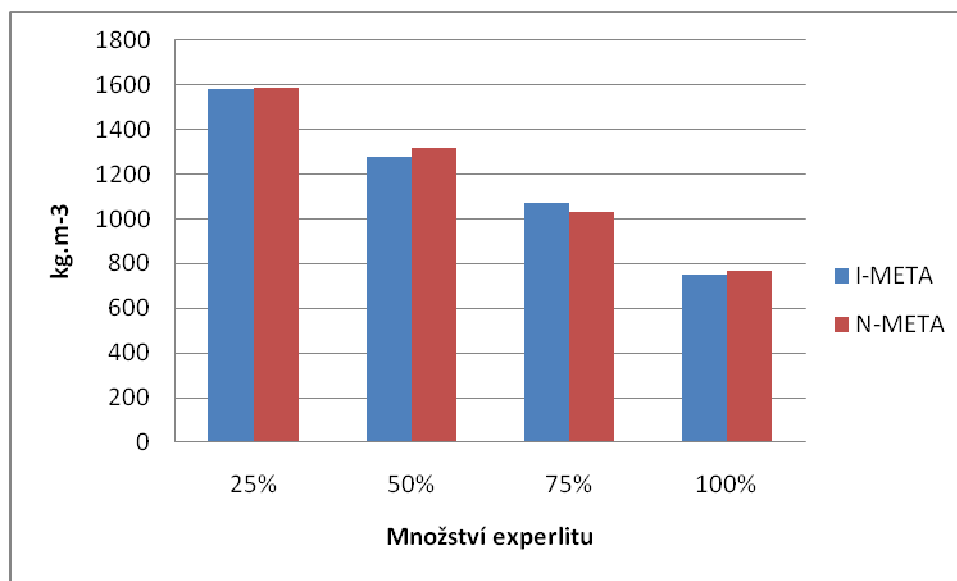
Obr. 30. Objemová hmotnost těles po 7 dnech



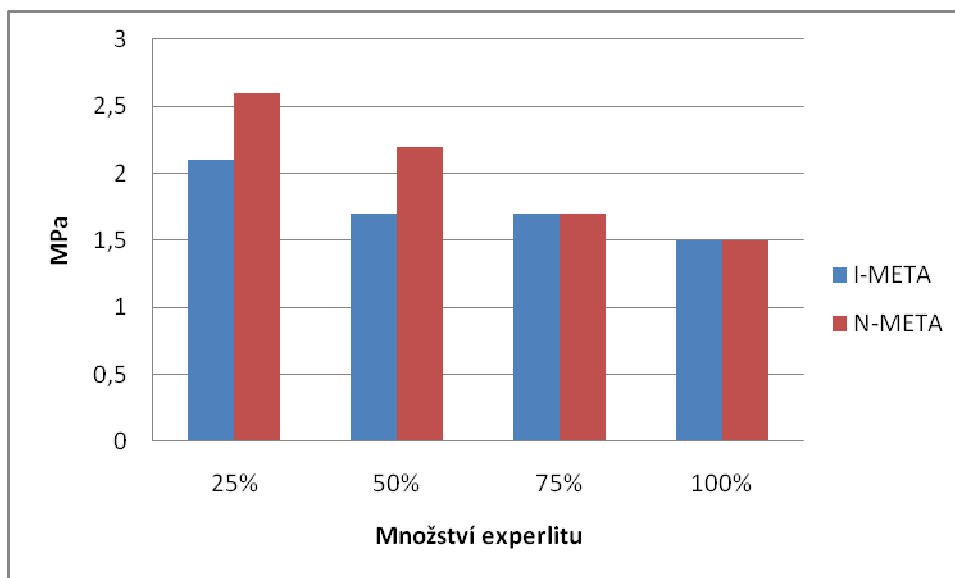
Obr. 31. Pevnost v tahu za ohybu těles po 7 dnech

Tab. 46. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 28 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. Průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META +25exp	25%	1	1566	1580	1,6	2,1
		2	1590		2,3	
		3	1590		2,3	
I-META +50exp	50%	1	1306	1280	1,8	1,7
		2	1304		1,8	
		3	1229		1,6	
I-META +75exp	75%	1	1092	1070	1,6	1,7
		2	1061		1,8	
		3	1056		1,6	
I-META +100exp	100%	1	790	750	1,6	1,5
		2	786		1,6	
		3	686		1,4	
N-META +25exp	25%	1	1614	1590	2,7	2,6
		2	1574		2,6	
		3	1567		2,4	
N-META +50exp	50%	1	1312	1320	2,3	2,2
		2	1341		2,3	
		3	1315		2,0	
N-META +75exp	75%	1	1024	1030	1,7	1,7
		2	1053		1,5	
		3	1022		1,9	
N-META +100exp	100%	1	749	770	1,8	1,5
		2	815		1,4	
		3	755		1,3	



Obr. 32. Objemová hmotnost těles po 28 dnech



Obr. 33. Pevnost v tahu za ohybu těles po 28 dnech

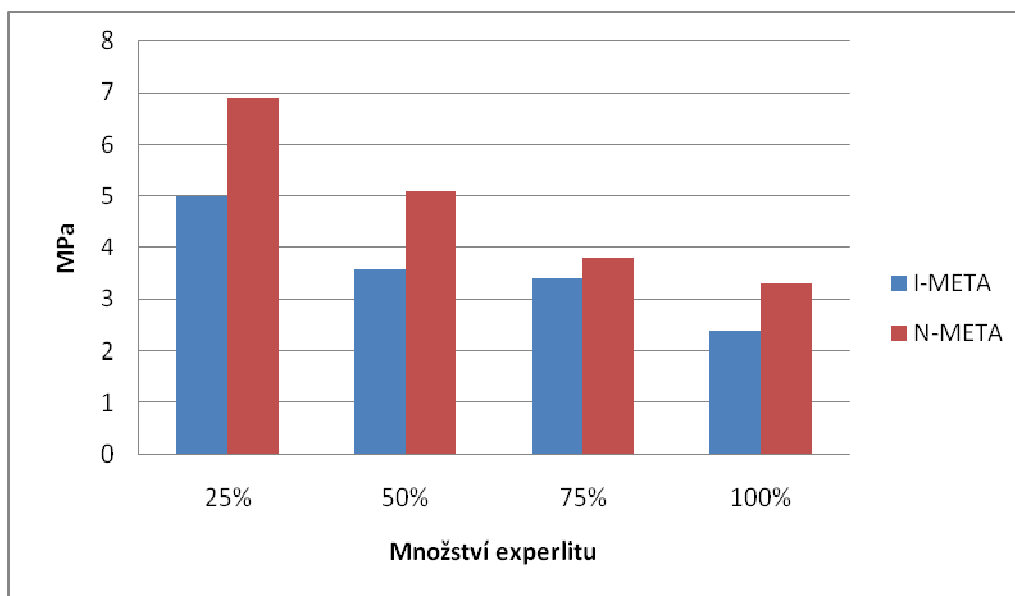
Zkouška pevnosti v tlaku

Tab. 47. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META +25exp	25%	1-1	4,8	5,0
		1-2	4,9	
		2-1	4,9	
		2-2	5,1	
		3-1	5,2	
		3-2	5,3	
I-META +50exp	50%	1-1	3,6	3,6
		1-2	3,7	
		2-1	3,6	
		2-2	3,7	
		3-1	3,5	
		3-2	3,5	
I-META +75exp	75%	1-1	3,4	3,4
		1-2	3,4	
		2-1	3,3	
		2-2	3,3	
		3-1	3,6	
		3-2	3,4	
I-META +100exp	100%	1-1	2,5	2,4
		1-2	2,4	
		2-1	2,4	
		2-2	2,2	
		3-1	2,5	
		3-2	2,4	

Tab. 47. - Pokračování

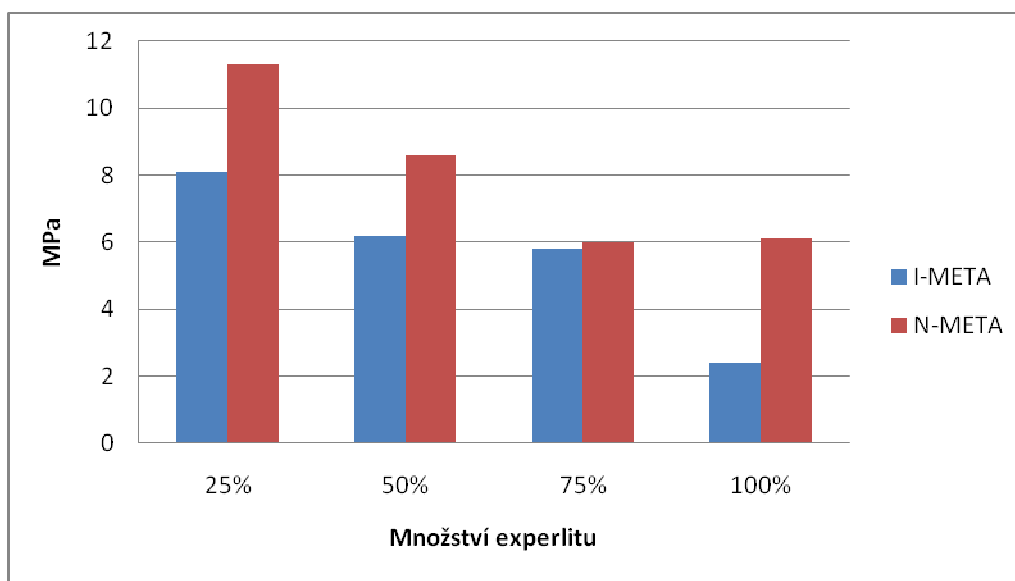
N-META +25exp	25%	1-1	7,0	6,9
		1-2	6,8	
		2-1	6,9	
		2-2	6,8	
		3-1	7,1	
		3-2	6,8	
N-META +50exp	50%	1-1	4,9	5,1
		1-2	5,0	
		2-1	5,2	
		2-2	5,1	
		3-1	5,1	
		3-2	5,3	
N-META +75exp	75%	1-1	3,8	3,8
		1-2	3,8	
		2-1	3,9	
		2-2	3,8	
		3-1	3,8	
		3-2	3,7	
N-META +100exp	100%	1-1	3,1	3,3
		1-2	3,3	
		2-1	3,3	
		2-2	3,3	
		3-1	3,3	
		3-2	3,2	



Obr. 34. Pevnost v tlaku po 7 dnech

Tab. 48. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META +25exp	25%	1-1	7,8	8,1
		1-2	7,6	
		2-1	8,1	
		2-2	8,5	
		3-1	8,2	
		3-2	8,6	
I-META +50exp	50%	1-1	6,8	6,2
		1-2	6,6	
		2-1	6,5	
		2-2	6,5	
		3-1	5,5	
		3-2	5,5	
I-META +75exp	75%	1-1	6,2	5,8
		1-2	6,3	
		2-1	5,8	
		2-2	5,8	
		3-1	5,2	
		3-2	5,5	
I-META +100exp	100%	1-1	5,2	2,4
		1-2	4,7	
		2-1	5,0	
		2-2	4,7	
		3-1	4,2	
		3-2	4,3	
N-META +25exp	25%	1-1	12,8	11,3
		1-2	12,5	
		2-1	10,7	
		2-2	11,0	
		3-1	10,8	
		3-2	9,8	
N-META +50exp	50%	1-1	8,8	8,6
		1-2	8,7	
		2-1	8,7	
		2-2	8,4	
		3-1	8,3	
		3-2	8,4	
N-META +75exp	75%	1-1	6,0	6,0
		1-2	6,0	
		2-1	5,9	
		2-2	5,8	
		3-1	6,0	
		3-2	6,0	
N-META +100exp	100%	1-1	5,6	6,1
		1-2	5,8	
		2-1	6,6	
		2-2	6,7	
		3-1	6,0	
		3-2	5,6	



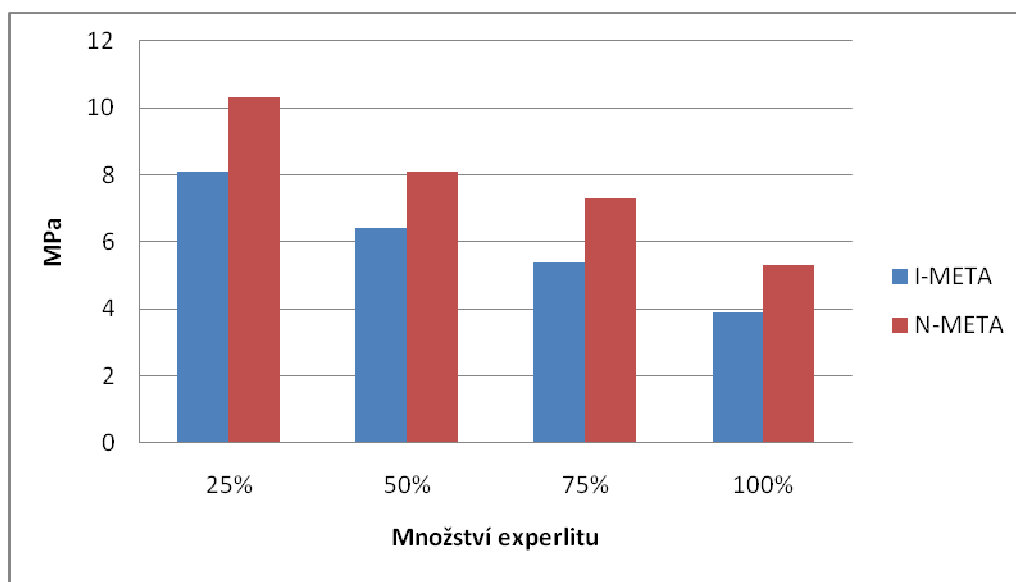
Obr. 35. Pevnost v tlaku po 28 dnech

Tab. 49. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 56 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META +25exp	25%	1-1	8,3	8,1
		1-2	8,0	
		2-1	8,0	
		2-2	7,6	
		3-1	9,0	
		3-2	7,6	
I-META +50exp	50%	1-1	6,2	6,4
		1-2	6,5	
		2-1	6,6	
		2-2	6,5	
		3-1	6,4	
		3-2	6,2	
I-META +75exp	75%	1-1	5,3	5,4
		1-2	5,3	
		2-1	5,5	
		2-2	5,4	
		3-1	5,4	
		3-2	5,5	
I-META +100exp	100%	1-1	3,7	3,9
		1-2	3,5	
		2-1	4,2	
		2-2	3,7	
		3-1	4,5	
		3-2	3,9	

Tab. 49. - Pokračování

N-META +25exp	25%	1-1	11,1	10,3
		1-2	10,1	
		2-1	10,9	
		2-2	10,2	
		3-1	10,2	
		3-2	9,1	
N-META +50exp	50%	1-1	8,4	8,1
		1-2	8,9	
		2-1	8,4	
		2-2	7,5	
		3-1	7,5	
		3-2	7,8	
N-META +75exp	75%	1-1	7,6	7,3
		1-2	7,8	
		2-1	7,7	
		2-2	7,9	
		3-1	6,2	
		3-2	6,3	
N-META +100exp	100%	1-1	5,5	5,3
		1-2	5,0	
		2-1	5,2	
		2-2	5,3	
		3-1	5,3	
		3-2	5,7	



Obr. 36. Pevnost tlaku těles po 56 dnech

Tepelná vodivost

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na ÚGN AV ČR v Ostrava (viz. podkap. 5.1.6.) Výsledky stanovení jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 50 – 51.).

Tab. 50. Tepelná vodivost vzorků s metakaolínem I-META 4

Vzorek	I-META	I-META +25%exp	I-META +50%exp	I-META +75%exp	I-META +100%exp
λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	1,350	0,533	0,311	0,208	0,106

Tab. 51. Tepelná vodivost vzorků s metakaolínem N-META 2

Vzorek	N-META	N-META +25%exp	N-META +50%exp	N-META +75%exp	N-META +100%exp
λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0,995	0,845	0,509	0,283	0,139

Pozn.: Celkové výsledky stanovení tepelné vodivosti jsou uvedeny v Příloze č.4

Zkouška mrazuvzdornosti

Tab. 52. Počet zmrazovacích cyklů vzorků s metakaolínem I-META 4

Vzorek	I-META +25%exp	I-META +50%exp	I-META +75%exp	I-META +100%exp
Počet cyklů	12	12	8	6

Tab. 53. Počet zmrazovacích cyklů vzorků s metakaolínem N-META 2

Vzorek	N-META +25%exp	N-META +50%exp	N-META +75%exp	N-META +100%exp
Počet cyklů	12	12	8	6

5.6. Experimentální náhrada kameniva i pojiva lehčeným metakaolínem

V této fázi práce byla navržena záměs s 25% náhradou jak kameniva, tak vápenného hydrátu lehčeným metakaolínem. Zvolen byl metakaolín Sedlec Ia + smrkové piliny z druhé fáze této práce. S tímto metakaolínem bylo dosaženo nejlepších výsledků (viz Tab. 32 a 33). Vápenný hydrát byl nahrazen 25% jemnozrnné fáze a kamenivo bylo za 25% nahrazeno frakcí nad 2mm. Takto připravená záměs byla odzkoušena na základní mechanické vlastnosti po 28 dnech.

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tab. 54. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. Průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
Sedlec + smrk	25%	1	1594	1600	1,9	2,1
		2	1606		2,2	
		3	1610		2,2	

Pevnost v tlaku

Tab. 55. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
Sedlec + smrk	25%	1-1	7,0	7,3
		1-2	6,2	
		2-1	7,7	
		2-2	7,6	
		3-1	7,3	
		3-2	7,7	

5.7. Ověření vlivu vlhčení v době zrání na výsledné vlastnosti malt

V třetí fázi této práce byly připraveny záměsi vápenných malt modifikovaných komerčními metakaolíny I-META 4 a N-META 2. V době zrání byla připravená tělesa vlhčena vodou z rozprašovače. Bylo proto rozhodnuto, že je potřeba ověřit zda nemá vlhčení negativní vliv na výsledné vlastnosti malt. Připravena byla tělesa s 50% modifikací obou metakaolínů. Pro každou záměs byly vyrobeny dvě sady těles, jedna byla vlhčena, druhá nikoli. Výsledky provedených zkoušek jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech (Tab. 56 – 60).

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Tab. 56. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 7 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. Průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META nevlhčená	50%	1	1819	1860	0,8	0,9
		2	1906		1,0	
		3	1868		0,9	

Tab. 56. - Pokračování

I-META vlhčená	50%	1	1857	1870	1,6	1,7
		2	1875		1,5	
		3	1877		1,5	
N-META nevlhčená	50%	1	1857	1840	1,5	1,5
		2	1850		1,6	
		3	1800		1,3	
N-META vlhčená	50%	1	1863	1850	2,0	1,5
		2	1851		1,7	
		3	1821		1,6	

Poznámka:

Pro tabulky tab. 56 - 60 znamená:

I-META – Vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem I-META 4

N-META – Vápenná malta s 50% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem N-META 2

Tab. 57. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 28 dnech

Záměs	Množství MK	Číslo	Obj. hmot. [kg.m ⁻³]	Obj. hmot. Průměr [kg.m ⁻³] (zaokrouhleno)	Pevnost v ohybu	
					R _f [MPa]	R _{prum} [MPa]
I-META nevlhčená	50%	1	1759	1760	2,0	2,0
		2	1774		2,2	
		3	1736		1,7	
I-META vlhčená	50%	1	1824	1820	2,3	2,1
		2	1841		2,0	
		3	1788		2,0	
N-META nevlhčená	50%	1	1773	1750	2,4	2,1
		2	1751		2,1	
		3	1729		1,9	
N-META vlhčená	50%	1	1823	1850	2,7	2,8
		2	1854		2,9	
		3	1878		2,8	

Zkouška pevnost tlaku

Tab. 58. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META nevlhčená	50%	1-1	4,1	3,9
		1-2	4,0	
		2-1	3,7	
		2-2	3,6	
		3-1	3,8	
		3-2	3,9	

Tab. 58. - Pokračování

I-META vlhčená	50%	1-1	5,1	5,3
		1-2	5,3	
		2-1	5,1	
		2-2	5,3	
		3-1	5,3	
		3-2	5,5	
N-META nevlhčená	50%	1-1	6,7	6,6
		1-2	6,9	
		2-1	6,6	
		2-2	6,1	
		3-1	6,4	
		3-2	6,6	
N-META vlhčená	50%	1-1	8,2	8,4
		1-2	8,8	
		2-1	8,0	
		2-2	8,6	
		3-1	8,4	
		3-2	8,4	

Tab. 59. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META nevlhčená	50%	1-1	10,3	10,5
		1-2	10,6	
		2-1	10,7	
		2-2	11,1	
		3-1	10,0	
		3-2	10,0	
I-META vlhčená	50%	1-1	9,4	9,6
		1-2	10,2	
		2-1	9,8	
		2-2	11,5	
		3-1	8,2	
		3-2	8,5	
N-META nevlhčená	50%	1-1	15,2	13,6
		1-2	14,4	
		2-1	14,1	
		2-2	14,3	
		3-1	12,0	
		3-2	11,8	
N-META vlhčená	50%	1-1	13,8	16,1
		1-2	13,1	
		2-1	17,8	
		2-2	17,9	
		3-1	18,5	
		3-2	15,2	

Tab. 60. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 56 dnech

Záměs	Množství experlitu	Číslo	Pevnost v tlaku	
			R _c [MPa]	R _{cpr} [MPa]
I-META nevlhčená	50%	1-1	10,1	11,3
		1-2	10,7	
		2-1	11,6	
		2-2	12,1	
		3-1	11,5	
		3-2	11,9	
I-META vlhčená	50%	1-1	8,2	10,7
		1-2	9,8	
		2-1	10,8	
		2-2	12,6	
		3-1	11,8	
		3-2	10,8	
N-META nevlhčená	50%	1-1	15,5	13,9
		1-2	15,7	
		2-1	14,6	
		2-2	12,7	
		3-1	11,6	
		3-2	13,0	
N-META vlhčená	50%	1-1	18,8	15,5
		1-2	13,3	
		2-1	16,4	
		2-2	15,1	
		3-1	15,1	
		3-2	14,0	

6. Vyhodnocení výsledků

Cílem této kapitoly je vyhodnocení a vzájemné porovnání zásadních výsledků fyzikálně-mechanických a trvanlivostních zkoušek, provedených na připravených vápenopucolánových maltách s obsahem jak lehčených metakaolínů, tak komerčních „klasických“ metakaolínů včetně malt s použitým experlitem jako lehčiva. Zjištěné hodnoty funkčních parametrů čerstvých i zatvrdlých malt byly prezentovány v předchozí kap.5.

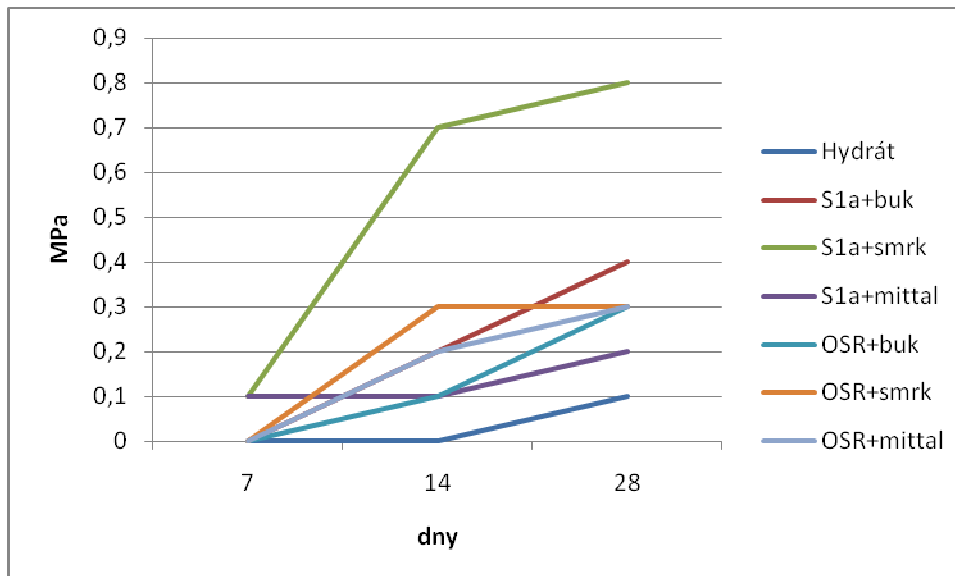
První fáze – lehčené metakaolíny (podkap. 5.2.)

V této fázi **nebylo prokázáno příznivé působení** připravených **lehčených metakaolínů na vápenné malty**. Díky velmi nízkým hodnotám pevností v tahu za ohybu po 14 dnech a pevnostem v tlaku dokonce až po 21 dnech nebylo možno na dostupném lise změřit pevnostní vlastnosti většiny malt. Lehčené metakaolíny jen velmi malou měrou zvýšily mechanické vlastnosti testovaných malt. Nejvyšší dosažené pevnosti v tahu za ohybu byly dosaženy po 28 dnech okolo 0,4 MPa. U pevností v tlaku se maxima po 28 dnech pohybovala těsně nad 1 MPa. U pevností v tlaku „vynikla“ pouze záměs na bázi jílu OSR a smrkových pilin s 15% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem, u které bylo dosaženo pevnosti 3,9 MPa. V tomto případě lze však předpokládat, že se jedná o náhodnou odchylku, případně chybu způsobenou při přípravě malty. Potvrzuje to také fakt, že výsledná mrazuvzdornost není adekvátní zvýšené hodnotě pevnosti (Tab.20.). U stejné záměsi, ale s použitím 30% metakaolínu bylo dosaženo maximální pevnosti pouze 0,9 MPa po 28 dnech. **Všechny výsledky měření byly srovnatelné nebo horší s vlastnostmi referenční malty bez metakaolínu.** Z provedených zkoušek vyplývá, že se zkoušené metakaolíny chovají spíše jako plnivo, což potvrzuje také zkouška mrazuvzdornosti. Při této zkoušce nastal rozpad u všech vzorků po 3 zmrazovacích cyklech, stejně jako u referenční malty. **Jediným pozitivem lehčených metakaolínů použitých v této fázi, je částečné snížení objemové hmotnosti malt.** Toto snížení však nelze považovat za výrazné. V nejlepším případě došlo ke snížení objemové hmotnosti o necelých 10%. **Celkově lze tedy usoudit, že takto připravené lehčené metakaolíny nejsou vhodně pro další laboratorní testování nebo použití.**

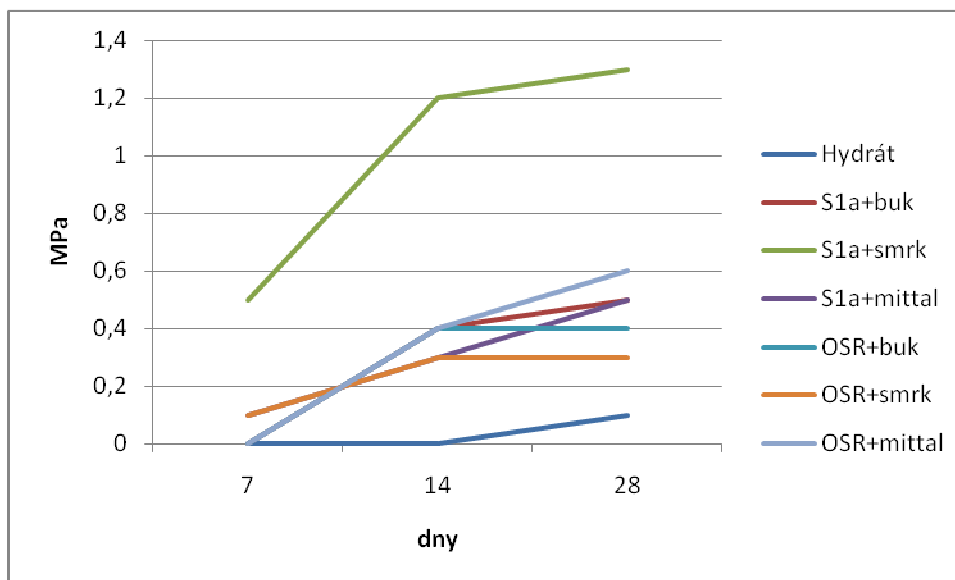
Druhá fáze – lehčené metakaolíny přemleté na menší zrnitost (podkap. 5.3.)

Po v podstatě neúspěšném použití lehčených metakaolínů v první fázi, byla u jejich vzorků **upravena zrnitost** a znovu odzkoušen vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti malt. Úprava je popsána v kap. 5. **Zjemnění zrnitosti metakaolínu mělo výrazný vliv již ve fázi**

přípravy malty. Výrazně se snížila spotřeba vody na požadovanou konzistenci. U mechanických vlastností došlo k částečnému zlepšení. Změnu je možno pozorovat již v tom že už po 7 dnech u některých vzorků již bylo možno změřit hodnoty pevností.. Tato pevnost narůstá i při zkouškách po 14 a 28 dnech (Obr.37. a 38.).



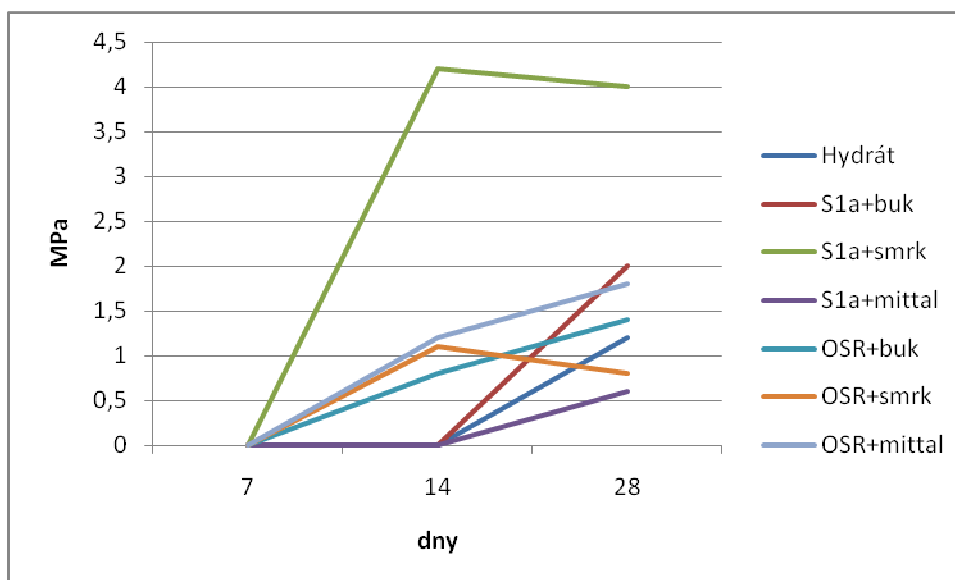
Obr. 37. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u 15% modifikace metakaolínem



Obr. 38. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u 30% modifikace metakaolínem

V obou případech, tj. 15% i 30% modifikace metakaolínem je možno pozorovat, že **lehčený metakaolín Sedlec Ia + smrkové piliny** dosahuje **nejlepších výsledků**. Nejinak tomu je i u pevností v tlaku. Tento metakaolín dosáhl nejvyšších pevností. U pevností v tlaku byly měřitelné hodnoty dosaženy až po 14 dnech zrání. Celkové však nebylo dosaženo výrazných vylepšení oproti první fázi testování. Zejména u 15% modifikace lze konstatovat,

že většina metakaolínů nemá téměř žádný vliv na vlastnosti malt. Výjimkou je již zmíněný metakaolín na bázi kaolínu **Sedlec Ia a smrkových pilin**. Tento metakaolín pozitivně ovlivnil také pevnosti v tlaku, kde **po 14 dnech** bylo dosaženo **4,2 MPa** a po 28 dnech došlo k částečnému snížení na 4 MPa při 30% modifikaci vápenného hydrátu (Obr.39.). **Vylepšení se projevilo také u zkoušky mrazuvzdornosti, kde tento metakaolín u 15% modifikace odolal 8 zmrazovacím cyklům a u 30% modifikace 10 cyklům.**



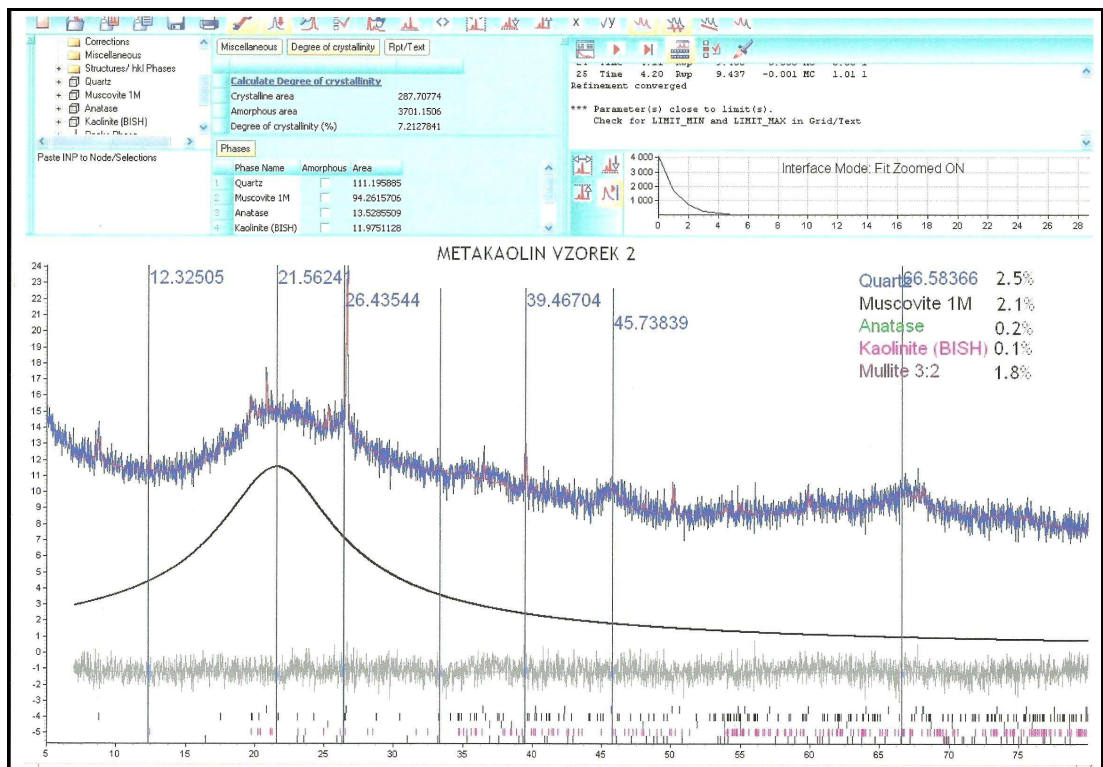
Obr.39. Nárůst pevnosti v tlaku u 30% modifikace metakaolínem

Přemletí a tím pádem snížení zrnitosti u lehčených metakaolínů mělo za následek, že se objemová hmotnost malt částečně zvýšila a tím zanikl požadovaný efekt jejich vylehčení. **Celkově první ani druhá fáze neprokázaly výrazný příznivý vliv připravených lehčených metakaolínů.** Analýzy **fázového složení** lehčených metakaolínů, aplikovaných ve druhé fázi (Obr. 40. a 41) a výsledky stanovení **pucolánové reaktivity** těchto metakaolínů (Tab. 61.) ukázaly, že připravené lehčené metakaolíny obsahují často **velmi vysoké obsahy mullitu** (až téměř 12% hm.). Tento fakt lze, s největší pravděpodobností přičítat procesu výpalu, kdy lehčené metakaolíny zřejmě vyžadují jinou dobu, teplotu a celkový režim výpalu než „klasické“ metakaolíny běžných objemových hmotností.

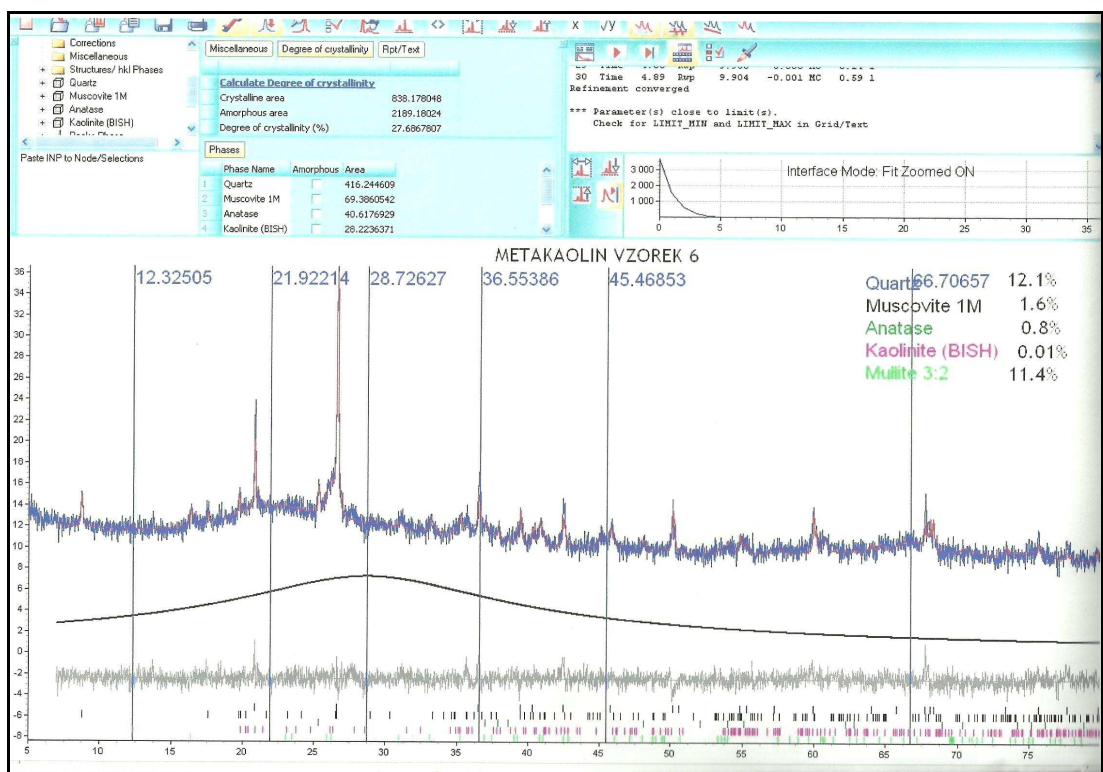
Tab.61. Výsledky stanovení pucolánové reaktivity Chapellovým testem

Lehčený metakaolín	S Ia + smrk	S Ia + buk	S Ia + popílek	OSR + smrk	OSR + buk	OSR + popílek
Pucolánová reaktivita [$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$]	610,5	461,2	504,8	432,1	481,9	418,9

Pozn.: Stanovení pucolánové reaktivity bylo provedeno na VÚSTAH Brno, a.s., Příloha č. 5



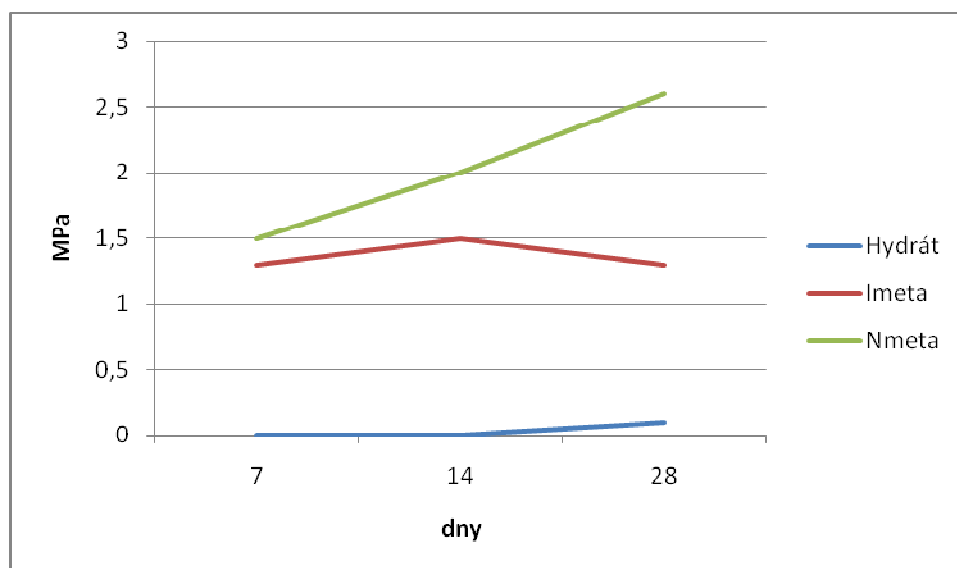
Obr.40. Výsledek stanovení fázového složení lehčeného metakaolínu na bázi kaolínu Sedlec Ia a smrkových pilin



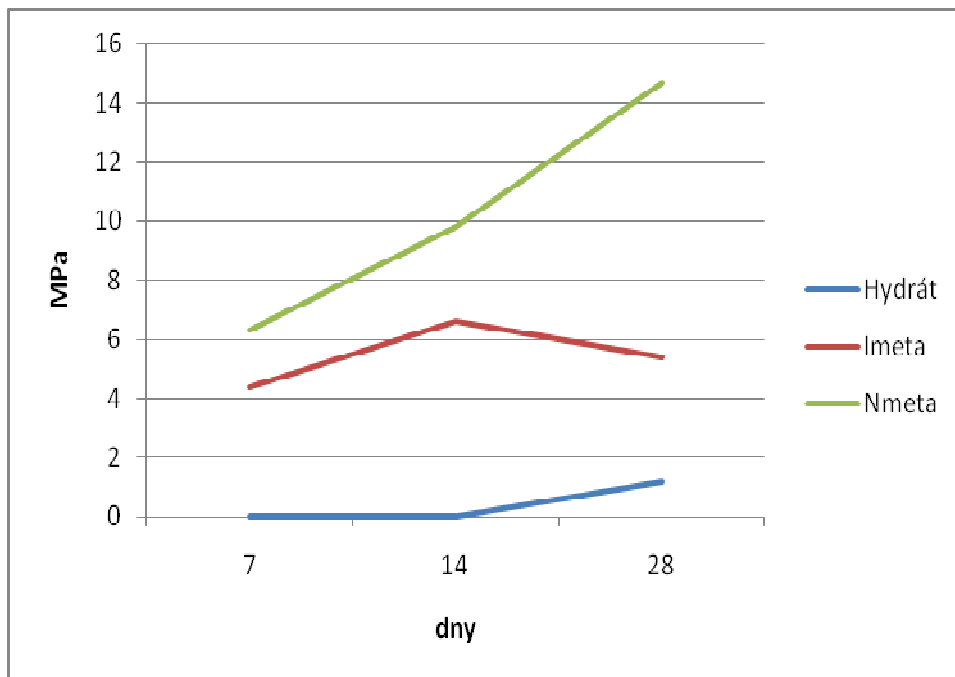
Obr.41. Výsledek stanovení fázového složení lehčeného metakaolínu na bázi lignitického jílu OSR a popílku Mittal

Třetí fáze – vápenné malty s komerčními metakaolíny (podkap. 5.4.)

Po „neúspěšném“ použití lehčených metakaolínů na bázi kaolínu Sedlec Ia, jílu OSR a pilin nebo popílku bylo v další fázi výzkumu zvoleno použití komerčních metakaolínů a lehčiva na jiné bázi. Vliv na toto rozhodnutí měly i jisté **výrobní a organizační změny** ve společnosti Sedlecký kaolín, a.s., které vedly k zájmu výrobce o jiné produkty. V této třetí fázi měly provedené zkoušky prokázat **pozitivní vliv komerčních („klasických“) metakaolínů na vápenné malty**. Rozdíl oproti předchozím fázím je patrný již po 7 dnech, kdy bylo dosaženo pevnosti v tahu za ohybu až 2,3 MPa u záměsi s 30% náhradou vápenného hydrátu metakaolínem N-META 2 a u stejné záměsi také 8,3 MPa pevnosti v tlaku. Záměs s použitím metakaolínu I-META 4 dosáhla po 7 dnech pevnosti v tahu za ohybu 1,7 MPa a pevnosti v tlaku 4,6 MPa u 30% modifikace. Z těchto hodnot lze usoudit, že **komerční metakaolíny způsobují poměrně rychlý nárůst pevností**. To lze doložit také hodnotami získanými po 14 a 28 dnech, kdy zvýšení již ve většině případů probíhá razantně prvních 14 dnů a následně dochází v některých případech k částečnému snížení. Výjimkou je metakaolín N-META 2 v 50% modifikaci, kdy dochází k výraznému nárůstu po celou dobu zrání. **Nejvyšších naměřených hodnot dosahovala vápenná malta s 50% modifikací metakaolínem N-META 2**, a to 2,6 MPa u pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech (Obr.42.) a **14,7 MPa** u pevnosti v tlaku (Obr.43.). Metakaolín I-META 4 dosahoval nejlepších výsledků u 30% modifikace. V tomto případě však po 14 dnech dochází k částečnému snížení pevností. V tahu za ohybu bylo dosaženo po 14 dnech 1,7 MPa a po 28 dnech se pevnost snížila na 1,5MPa. Pevnost v tlaku zůstala po 14 dnech již téměř neměnná. Po 28 dnech bylo dosaženo 6,4MPa.



Obr. 42. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u 50% modifikace metakaolínem



Obr. 43. Nárůst pevnosti v tlaku u 50% modifikace metakaolínem

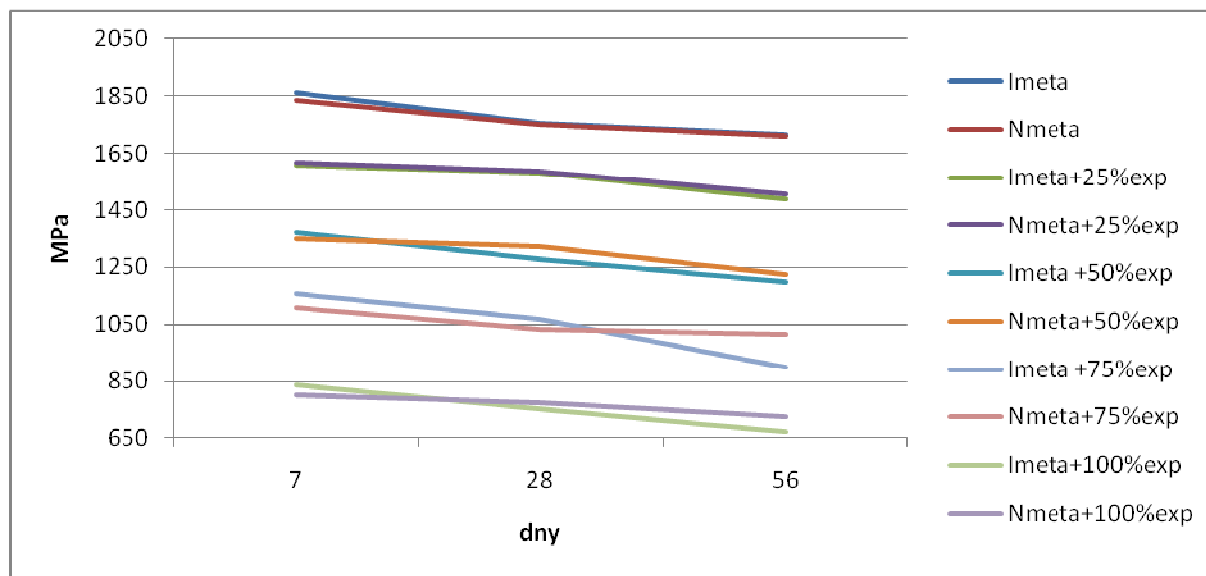
Příznivé vlastnosti komerčních metakaolínů potvrzuje také provedená zkouška mrazuvzdornosti. U náhrady vápenného hydrátu 50% metakaolínem tělesa odolala až **17 zmrazovacím cyklům**. Lze tedy říct, že v celkovém měřítku mají použité metakaolíny výrazně pozitivní vliv na vlastnosti vápenných malt. V některých případech, především u metakaolínu **N-META 2**, zvyšují **mechanické vlastnosti více než desetinásobně**.

Čtvrtá fáze – použití komerčních metakaolínů a experlitu jako lehčiva (podkap. 5.5.)

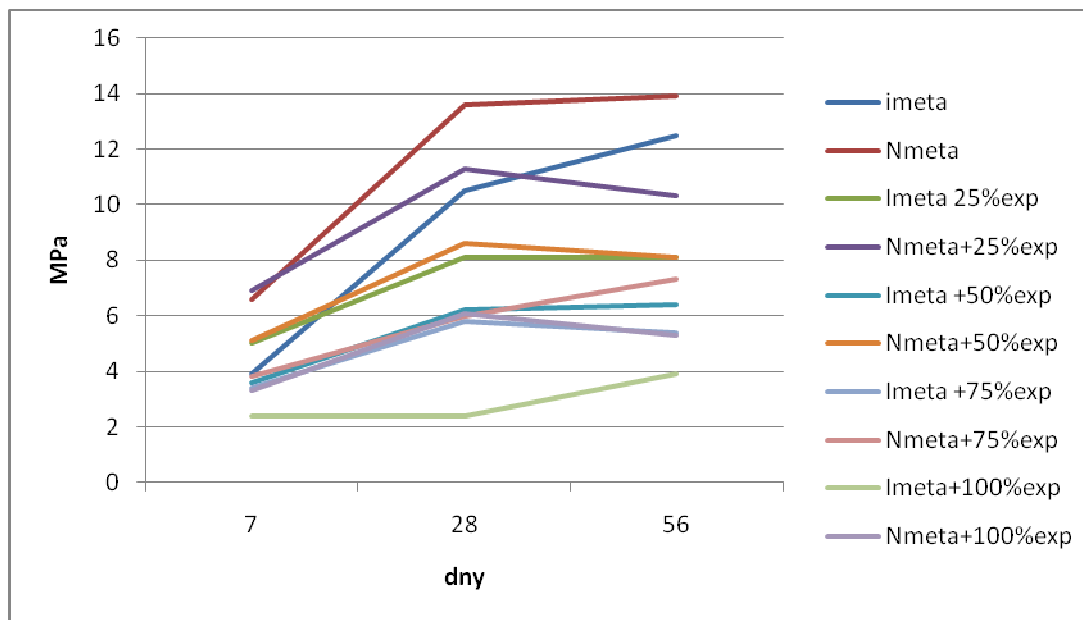
V této fázi byly ověřovány vlastnosti malt s 50% modifikací komerčními metakaolínými I-MATA 4 a N-META 2. Zároveň však bylo u těchto malt **kamenivo nahrazováno expandovaným perlitem**. Provedené zkoušky prokázaly, že úměrně množství vylehčení, se snižují pevnosti malt. Stejně jako u předchozí fáze měly malty modifikované metakaolínými rychlý nárůst pevností. Již po sedmi dnech dosahovaly pevností v tahu za ohybu 1,3 MPa u záměsi s metakaolínem **N-META 2** a **50% náhradou kameniva perlitem**. U pevnosti v tlaku bylo dosaženo **6,1MPa** u stejné záměsi a dokonce směs s N-META 2 a 100% náhradou kameniva perlitem dosáhla pevnosti 3,3MPa. U všech záměsí docházelo k nárůstu pevností a současně klesala objemová hmotnost.

U **100% náhrady kameniva experlitem** byla po 56 dnech **objemová hmotnost o 60% nižší** než stejná malta bez vylehčení (Obr.44.). Vzhledem k nízké objemové hmotnosti lze tyto malty považovat za tepelně izolační. Z toho důvodu byly provedeny také měření

součinitele tepelné vodivosti (Obr.46.). Měřením bylo zjištěno, že **vylehčení expandovaným perlitem snižuje tepelnou vodivost až o 92% u 100% vylehčení.** Spolu s vysokou hodnotou pevnosti v tlaku by se malta se 100% vylehčením experlitem dala zařadit dle normy ČSN EN 988-1 [2] jako třída CIII.

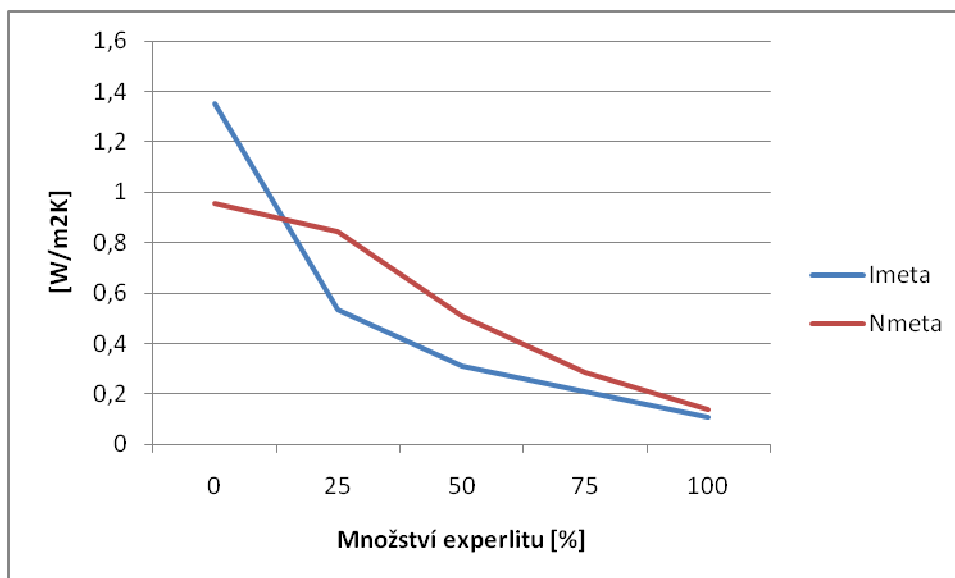


Obr. 44. Vývoj objemové hmotnosti s metakaolínem a vylehčením



Obr. 45. Nárůst pevností v tlaku

Srovnáním objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku se zjišťuje, že snížení objemové hmotnosti je úměrné snížení pevnosti. Pokud se objemová hmotnost sníží o 60%, pevnost v tlaku klesne přibližně stejnou hodnotou (Obr.44. a 45.).



Obr. 46. Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na množství experlitu

Na připravených vzorcích byla také provedena **zkouška mrazuvzdornosti**. Tato zkouška potvrdila, že **komerční metakaolíny zvyšují odolnost malt vůči působení nízkých teplot**. Samozřejmě odolnost klesá s množstvím experlitu, avšak u malt nedochází k totálnímu rozpadu, ale spíše k šupinovému odpadávání povrchových vrstev. Není tedy porušena celistvost těles (Obr.47.).



Obr. 47. Šupinové porušení povrchu těles při zkoušce mrazuvzdornosti(Nmeta + 75% experlitu)

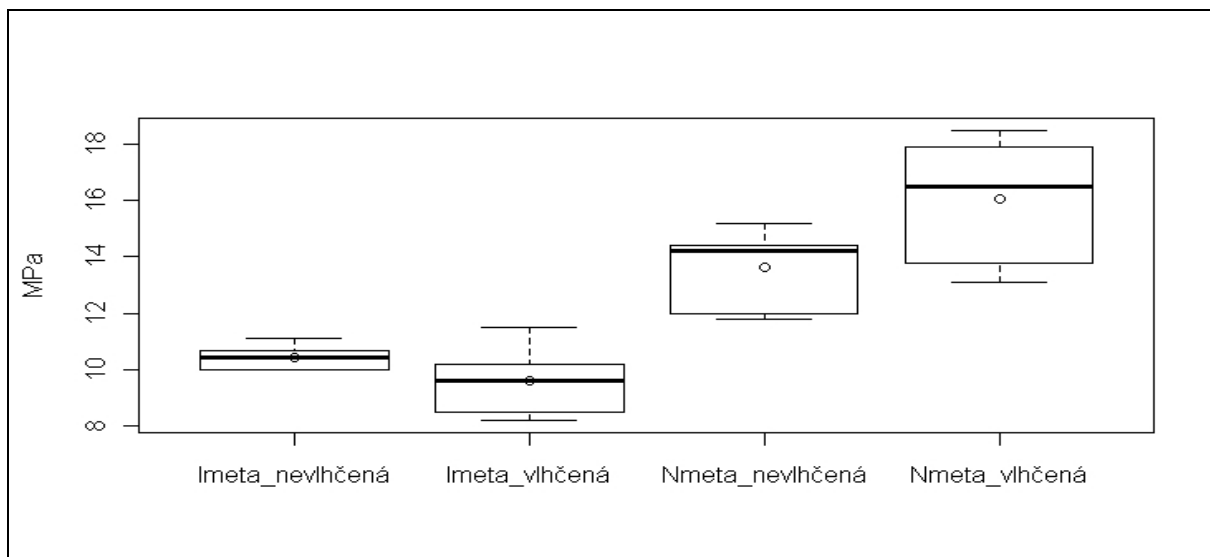
Lze tedy konstatovat, že **použití komerčních metakaolínů společně s expandovaným perlitem jako plnivem, je vhodné pro snížení objemové hmotnosti vápenopucolánových malt a tím pádem také snížení jejich tepelné vodivosti. I při dosažení objemové hmotnosti 690 kg.m^{-3} a tomu odpovídající tepelné vodivosti přibližně $0,100 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ dosahuje tepelně izolační malta pevnosti v tlaku 3,5 MPa.**

Experimentální použití lehčeného metakaolínu jako plniva a zároveň pojiva (podkap.5.6.)

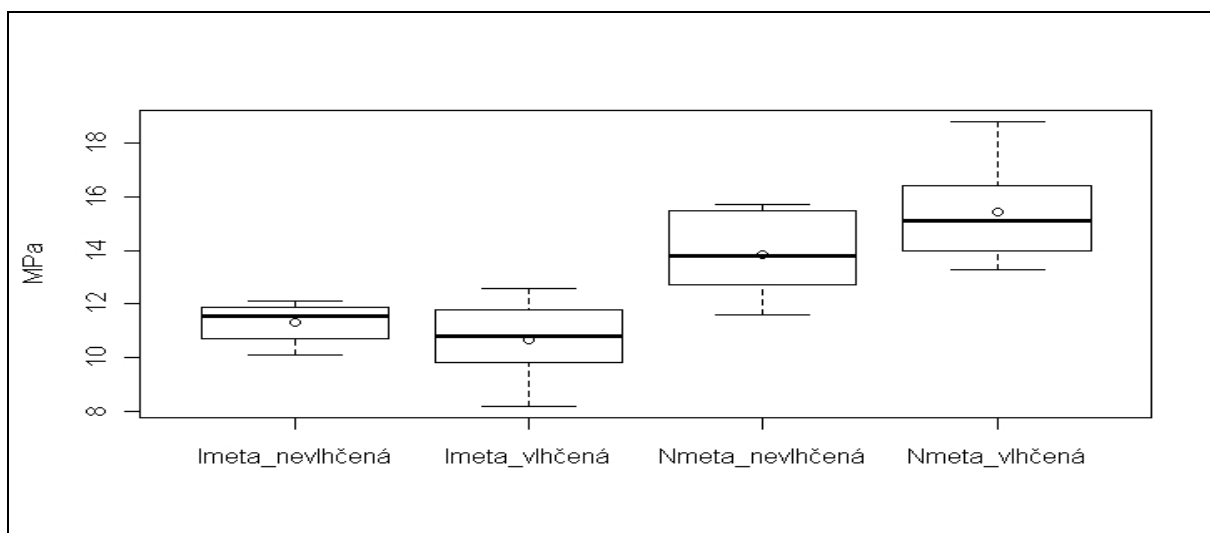
Lehčený metakaolín s nejlepšími dosaženými výsledky v druhé fázi byl použit jako náhrada vápenného hydrátu a současně byla frakce lečeného metakaolínu použita jako náhrada za plnivo. **Obě složky byly nahrazeny z 25%**. Pojivová složka však hmotnostně, ale plnivo vzhledem k nízké objemové hmotnosti lehčeného metakaolínu bylo nahrazeno objemově. Na připravených vzorcích byly odzkoušeny pouze 28 denní pevnosti a změřena objemová hmotnost. Výsledky ukazují, že takto použitý lehčený metakaolín má pozitivní vliv na vápenné malty. **Dosažená pevnost v tlaku 7,3MPa ukazuje, že se metakaolín částečně vyrovná komerčnímu metakaolínu I-META 4.** Objemová hmotnost oproti vápennému hydrátu klesla na 1600 kg.m^{-3} , což se dá srovnat se maltou, kde bylo použito stejné množství expandovaného perlitu.

Ověření vlivu vlhčení v době zrání na výsledné vlastnosti vápenných malt (podkap. 5.7.)

Toto ověření mělo pomoci určit zda vlhčení nemá v době zrání vliv na snížení výsledných pevností zatvrdlých malt.. Z toho důvodu byly vytvořeny dvě sady těles obsahujících 50% komerčních metakaolínů I-META 4 a N-META 2. Jedna sada byla vlhčena vodou z roprašovače, druhá nikoliv. Následně byly provedeny zkoušky mechanických vlastností a také zkouška mrazuvzdornosti. Výsledky ukázaly, že **vlhčením lze dosáhnout v průměru vyšších pevností, zejména v tlaku, avšak tento způsob ošetřování způsobuje mnohem větší rozptyl naměřených hodnot.** To může mít za následek snížení spolehlivosti materiálu. Co se týče odolnosti vůči zmrazovacím cyklům, nemá vlhčení zásadní vliv. Vzorky s metakaolínem N-META 2 vydržely shodně 16 cyklů. U záměsí s metakaolínem I-META 4 se vlhčené vzorky rozpadly po 10 cyklech, zatímco nevlhčené po 12 cyklech. Na následujících obrázcích (Obr.48. a 49.) jsou zobrazeny rozptyly hodnot u pevností v tlaku po 28 a 56 dnech.



Obr. 48. Rozptyl hodnot pevností v tlaku po 28 dnech (kroužek zobrazuje aritmetický průměr)



Obr. 49. Rozptyl hodnot pevností v tlaku po 56 dnech (kroužek zobrazuje aritmetický průměr)

7. Závěr

Hlavním cílem předložené diplomové práce bylo studium vlastností vápenných malt, modifikovaných přísadkou experimentálně připraveného lehčeného metakaolínu. Lehčený metakaolín, resp. metakaolín se zvýšenou pórovitostí je novým typem metakaolínu, který prozatím není v České republice průmyslově vyráběn a není komerčně dostupný na trhu. Lehčený metakaolín se oproti „klasickým“ metakaolínům vyznačuje nižší objemovou hmotností, podstatně vyšší makroporozitou a tím pádem výrazně nižší tepelnou vodivostí. Jemný prášek má, navíc, ve směsi s vodou výborné reologické vlastnosti. Lehčený metakaolín by mohl mít v budoucnu využití jak v průmyslu stavebních hmot, tak také při výrobě žáruvzdorných materiálů, kde představuje jistý „předstupeň“ lehčeného šamotu. Výroba lehčených metakaolínů vychází z přípravy vhodné surovinové směsi, složené z plastické složky bohaté na kaolinit a lehčiva, jehož vyhořením při následné kalcinaci dochází k tvorbě otevřených pórů. Při eventuální průmyslové výrobě lehčených metakaolínů by se mohly výrazně uplatnit alternativní jílové suroviny, dosud nevyužívané v silikátovém průmyslu. Volbou množství lehčiva v surovinové směsi lze pak rovněž „nastavit“ výslednou pórovitost systému a s tím související objemovou, resp. sypanou hmotnost lehčeného metakaolínu.

Z výsledků, prezentovaných v kap.5 a shrnutých a diskutovaných v kap.6 této diplomové práce vplynuly tyto stěžejní závěry, popřípadě doporučení pro další výzkum v problematice lehčených metakaolínů:

- lehčené metakaolíny připravené na bázi kaolínu Sedlec Ia, jílu OSR, pilin z výroby měkkého i tvrdého řeziva a teplárenského popílku ArcelorMittal nedosáhly předpokládaných vlastností a tato skutečnost se projevila rovněž v mechanických a trvanlivostních parametrech vápenopucolánových malt, testovaných v první a druhé fázi diplomové práce,
- důvodem nedostatečných vlastností lehčených metakaolínů mohl být způsob přípravy surovinové směsi (tj. nevhodný typ mísícího zařízení a z toho vyplývající špatné rozmíchání lehčiva v plastické složce), způsob výpalu (použitá podoba páleného výsušku, typ pece, teplota a doba výpalu jsou „odzkoušeny“ pro „klasické“ metakaolíny, ale toto nemusí být přenosné pro metakaolíny s vysokou pórovitostí) nebo následná úprava výpalku (použitý odrazový drtič produkuje poměrně vysoký podíl jemných částic, čímž se stírají pozitiva systému s nízkou objemovou hmotností),

- momentálně nízká kvalita laboratorně připravených lehčených metakaolínů byla potvrzena výsledky stanovení fázového složení pomocí RTG-difrakce (některé vzorky obsahovaly až téměř 12 hm.% mullitu, což indikuje příliš vysokou teplotu výpalu a s tím související zvýšený podíl hydraulicky neaktivních složek), stanovením pucolánové reaktivity Chapellovým testem (lehčené metakaolíny dosahovaly poloviční, maximálně dvoutřetinové hodnoty reaktivity oproti komerčním metakaolínům N-META 2 i I-META 4) a nízkými hodnotami pevnosti vápenopucolánových malt v tlaku,
- z důvodu původně nepředpokládaných technologických a organizačních komplikací při přípravě lehčených metakaolínů bylo studium tepelně izolačních malt ve čtvrté fázi laboratorního testování doplněno o vápenopucolánové malty s obsahem „klasických“ metakaolínů a expandovaného perlitu jako lehkého kameniva,
- vápenopucolánové malty s poměrem vápenného hydrátu a metakaolínu 1:1 a kamenivem pouze na bázi expandovaného perlitu dosáhly objemové hmotnosti přibližně $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pevnosti v prostém tlaku až 6 MPa a koeficientu tepelné vodivosti v rozpětí $0,100 - 0,140 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; tyto malty lze hodnotit jako mimořádně tepelně izolační s tím, že jejich odolnost vůči působení mrazu je zhruba dvojnásobná oproti „klasické“ vápenné maltě.
- z dosažených výsledků zkoušky pevnosti v prostém tlaku (okolo 7 MPa) u vápenopucolánové malty, v jejíž receptuře bylo 25% vápenného hydrátu nahrazeno jemně mletým lehčeným metakaolínem na bázi kaolínu Sedlec Ia a smrkových pilin a týmž metakaolínem bylo zároveň nahrazeno 25% křemenného písku jako plniva vyplývá, že lehčené metakaolíny mohou mít pozitivní vliv na vlastnosti malt jak ve formě aktivního pojiva, tak zejména plniva,
- lehčené metakaolíny představují perspektivní složku lehkých malt a omítek, další studium je však potřeba zaměřit na výběr potenciaálně vhodných surovin, definování nejvhodnějšího způsobu míchání směsi, volbu optimálního množství lehčiva, způsob výpalu a následného drcení.

Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] ČSN EN 196-1 – *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*, Český normalizační institut, Praha, 2003
- [2] ČSN EN 998-1 - *Specifikace malt pro zdivo - Část 1: Malty pro vnitřní a vnější omítky*, Český normalizační institut, Praha, 2003
- [3] ČSN EN 1015-2 – *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt*, Český normalizační institut, Praha, 1999
- [4] ČSN EN 1015-3 – *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku)*, Český normalizační institut, Praha, 1999
- [5] ČSN EN 1015-10 – *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty*, Český normalizační institut, Praha, 2000
- [6] ČSN EN 1015-11 – *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*, Český normalizační institut, Praha, 2000
- [7] ČSN 72 2452 – *Zkouška mrazuvzdornosti malty*, Český normalizační institut, Praha, 1968
- [8] Bárta, R.: *Chemie a technologie cementu*. Nakladatelství ČSAV, 1961, 1107 s.
- [9] Drottnerová, J., Holešinský, R., Fáberová, J.: *Možnosti využití metakaolinu ve stavebním průmyslu. Sbor. VI. konf. „Nové stavební hmoty a výrobky“*. Brno: VÚSTAH, 2002, s.185–190.
- [10] Hošek, J., Losos, L.: *Historické omítky*. Praha: Grada Publishing, a.s, 2007, 168 s. ISBN 978-80-247-1395-3.
- [11] Koutník, P. et al: *Vliv obsahu pucolánu na bázi metakaolinitu na vlastnosti vápenných malt. In Sbor. příspěvků semináře „Metakaolin 2009“*. Brno: FAST VUT v Brně, 2009, s. 74- 81.
- [12] Mec, P.: *Studium vlastností cementových malt, s přídavkem metakaolínu vyrobeného z alternativních surovin.*, Bakalářská práce, Ostrava: FAST VŠB-TUO, 2009
- [13] Ptíčen, F., Raus, M: *Suroviny a jejich úprava pro výrobu metakaolinu. In Sbor. příspěvků semináře „Metakaolin 2009“*. Brno: FAST VUT v Brně, 2009, s. 118 -129.
- [14] Ptíčen, F., Vavro, M.: *Lehčený metakaolín. In Sbor. konf. „Žárovzdorné materiály“*. Praha: Silikátová společnost České republiky, 2009, s 71-78.
- [15] Rovnaníková, P.: *Omítky. Chemické a technologické vlastnosti*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek – STOP, 2002, 89 s. ISBN 80-86657-00-0.
- [16] Rovnaníková, P.: *Pucolány ve vápenných omítkách. In Sbor. konference „Sanace a rekonstrukce staveb“*. Brno: WTA CZ, 2003, s. 69-74.

- [17] Rovnaníková, P.: *Materiály historických omítek*. In *Sbor. konf. Obnova památek 2004 – Omítky historických budov*. Praha: WTA CZ, přístupno z <http://www.studioaxis.cz/index.asp?menu=633&record=4015>
- [18] Ronaníková, P., Křístek, R.: *Pucolány jako modifikující přísady do vápenných malt*. *Informační zpravodaj, č. 3 a 4, 2003*, Praha: VUMO, s. 111-116.
- [19] Rovnaníková, P., Vaverka, R., Vražičová, J.: *Metakaolin jako pucolánová přísada do vápenných malt*. In *Sbor. konference „Sanace a rekonstrukce staveb“*. Praha: WTA CZ, 2002, s. 88-93, ISBN 80-02-01502-9.
- [20] Keršner, Z., et al: *Lomově mechanické vlastnosti omítkových malt, modifikovaných metakaolinem Mefisto K05*. In *Sbor. příspěvků semináře „Metakaolin 2007“*. Brno: FAST VUT v Brně, 2007, s. 118 -129.
- [21] Tesárek, P., et al: *Vápenná omítka s přísadou metakaolinu: Mechanické, tepené a vlhkostní vlastnosti*. In *Sbor. příspěvků semináře „Metakaolin 2007“*. Brno: FAST VUT v Brně, 2007, s. 118 -129.
- [22] Slížková, Z.: *Vývoj směsného hydraulického pojiva na bázi metakaolinu*. In *Sbor. konf. Obnova památek 2004 – Omítky historických budov*. Praha: WTA CZ, přístupno z <http://www.studioaxis.cz/index.asp?menu=633&record=4015>
- [23] Weiss, Z., Kužvart, M.: *Jílové minerály, jejich nanostruktura a využití*. Karolinum, Praha, 2005, 280 s.

Seznam tabulek

Tab. 1. Složení maltových směsí na bázi vápenný hydrát a metakaolín

Tab. 2. Výsledky stanovení materiálových vlastností vápenné malty, modifikované příměsí metakaolínu

Tab.3. Vybrané chemicko-technologické vlastnosti jemnozrnných karlovarských, podbořanských a kadaňských plavených kaolínů pro výrobu metakaolínu

Tab. 4. Chemické vlastnosti a míra rozptření vybraných českých metakaolínů vyráběných z jemnozrnných plavených kaolínů (typické hodnoty)

Tab. 5. Vlastnosti kusových lehčených metakaolínů a jejich porovnání s „klasickými“ metakaolíny

Tab. 6. Chemické složení vstupních plastických surovin (v hm.%)

Tab. 7. Granulometrie a sypná hmotnost použitých pilin

Tab. 8. Parametry popílků ArcelorMittal (v hm.%)

Tab. 9. Zrnitost použitého popílku ArcelorMittal

Tab. 10. Granulometrie a sypná hmotnost lehčených metakaolínů

Kapitola 5.2.

Tab. 11. Hodnota rozlití čerstvé malty na střešacím stolku

Tab. 12. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Tab. 13. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Tab. 14. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 15. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 16. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 21 dnech

Tab. 17. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 21 dnech

Tab. 18. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 19. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 20. Počet zmrazovacích cyklů, kterým tělesa odolaly

Kapitola 5.3.

Tab. 21. Hodnota rozlití čerstvé malty na střešacím stolku

Tab. 22. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Tab. 23. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Tab. 24. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Tab. 25. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Tab. 26. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 27. Pevnosti v tahu za ohybu těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 28. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Tab. 29. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 7 dnech

Tab. 30. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Tab. 31. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 14 dnech

Tab. 32. Pevnosti v tlaku těles s 15% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 33. Pevnosti v tlaku těles s 30% modifikací vápenného hydrátu po 28 dnech

Tab. 34. Počet zmrazovacích cyklů u těles s 15% modifikací MK

Tab. 35. Počet zmrazovacích cyklů u těles s 30% modifikací MK

Kapitola 5.4.

Tab. 36. Hodnota rozlití čerstvé malty na střešacím stolku

Tab. 37. Pevnosti v tahu za ohybu těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Tab. 38. Pevnosti v tahu za ohybu těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 14 dnech

Tab. 39. Pevnosti v tahu za ohybu těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Tab. 40. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Tab. 41. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 14 dnech

Tab. 42. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Tab. 43. Počet zmrazovacích cyklů

Kapitola 5.5.

Tab. 44. Hodnota rozlití čerstvé malty na střešacím stolku

Tab. 45. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 7 dnech

Tab. 46. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 28 dnech

Tab. 47. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Tab. 48. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Tab. 49. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 56 dnech

Tab. 50. Tepelná vodivost vzorků s metakaolínem I-META 4

Tab. 51. Tepelná vodivost vzorků s metakaolínem N-META 2

Tab. 52. Počet zmrazovacích cyklů vzorků s metakaolínem I-META 4

Tab. 53. Počet zmrazovacích cyklů vzorků s metakaolínem N-META 2

Kapitola 5.6.

Tab. 54. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 28 dnech

Tab. 55. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Kapitola 5.7.

Tab. 56. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 7 dnech

Tab. 57. Pevnosti v tahu za ohybu modifikovaných malt s vylehčením po 28 dnech

Tab. 58. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 7 dnech

Tab. 59. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 28 dnech

Tab. 60. Pevnosti v tlaku těles s modifikací vápenného hydrátu MK po 56 dnech

Kapitola 6.

Tab. 61. Výsledky stanovení pucolánové reaktivity Chapellovým testem

Seznam obrázků

Obr. 1. Ideální průběh zahřívání kaolinitu vyjádřený DTA/TG křivkou

Obr. 2. Vliv obsahu metakaolínu na pevnost vápenopucolánové malty v tlaku

Obr. 3. Pevnosti v tlaku zkoušených vápenných malt modifikovaných různými typy metakaolínů

Obr. 4. Mikrofotografie pórové struktury lehčeného metakaolínu LE 3

Obr. 5. Laboratorní míchačka

Obr. 6. Střásací stůl

Obr. 7. Rozložení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

Obr. 8. Rozložení zkoušky pevnosti v tlaku

Obr. 9. Isomet 2104 pro stanovení teplotní vodivosti

Kapitola 5.2.

Obr. 10. Objemová hmotnost vzorků po 14 dnech

Obr. 11. Pevnosti v tahu za ohybu po 14 dnech

Obr. 12. Objemová hmotnost po 28 dnech

Obr. 13. Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech

Obr. 14. Pevnost v tlaku po 21 dnech

Obr. 15. Pevnost v tlaku po 28 dnech

Kapitola 5.3.

Obr. 16. Objemová hmotnost těles po 7 dnech

Obr. 17. Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech

Obr. 18. Objemová hmotnost těles po 14 dnech

Obr. 19. Pevnost v tahu za ohybu těles po 14 dnech

Obr. 20. Objemová hmotnost těles po 28 dnech

Obr. 21. Pevnost v tahu za ohybu těles po 28 dnech

Obr. 22. Pevnost v tlaku těles po 14 dnech

Obr. 23. Pevnost v tlaku těles po 28 dnech

Kapitola 5.4.

Obr. 24. Pevnost v tahu za ohybu těles po 7 dnech

Obr. 25. Pevnost v tahu za ohybu těles po 14 dnech

Obr. 26. Pevnost tahu za ohybu těles po 28 dnech

Obr. 27. Pevnost tlaku těles po 7 dnech

Obr. 28. Pevnost v tlaku těles po 14 dnech

Obr. 29. Pevnost v tlaku těles po 28 dnech

Kapitola 5.5.

Obr. 30. Objemová hmotnost těles po 7 dnech

Obr. 31. Pevnost v tahu za ohybu těles po 7 dnech

Obr. 32. Objemová hmotnost těles po 28 dnech

Obr. 33. Pevnost v tahu za ohybu těles po 28 dnech

Obr. 34. Pevnost v tlaku po 7 dnech

Obr. 35. Pevnost v tlaku po 28 dnech

Obr. 36. Pevnost tlaku těles po 56 dnech

Kapitola 6.

Obr. 37. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u 15% modifikace metakaolínem

Obr. 38. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u 30% modifikace metakaolínem

Obr. 39. Nárůst pevnosti v tlaku u 30% modifikace metakaolínem

Obr. 40. Výsledek stanovení fázového složení lehčeného metakaolínu na bázi kaolínu Sedlec Ia a smrkových pilin

Obr. 41. Výsledek stanovení fázového složení lehčeného metakaolínu na bázi lignitického jílu OSR a popílku Mittal

Obr. 42. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u 50% modifikace metakaolínem

Obr. 43. Nárůst pevnosti v tlaku u 50% modifikace metakaolínem

Obr. 44. Vývoj objemové hmotnosti s metakaolínem a vylehčením

Obr. 45. Nárůst pevností v tlaku

Obr. 46. Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na množství experlitu

Obr. 47. Šupinovitě porušení povrchu těles při zkoušce mrazuvzdornosti ($N_{meta} + 75\%$ experlitu)

Obr. 48. Rozptyl hodnot pevností v tlaku po 28 dnech (kroužek zobrazuje aritmetický průměr)

Obr. 49. Rozptyl hodnot pevností v tlaku po 56 dnech (kroužek zobrazuje aritmetický průměr)

Seznam příloh

- Příloha 1 Granulometrická analýza teplárenského popílku z Arcelor Mittalu
- Příloha 2 Granulometrická analýza metakaolínu na bázi jílu Sedlec Ia a bukových pilin
- Příloha 3 Granulometrická analýza metakaolínu na bázi jílu Sedlec Ia a smrkových pilin
- Příloha 4 Hodnoty z měření součinitele tepelné vodivosti (podkap. 5.5.)
- Příloha 5 Chappelle test metakaolínu použitých v druhé fázi a metakaolínů I-META 4 a N-META 2