STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STAVEBNÍ JOSEFA GOČÁRA

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Stavebnictví, architektura a design interiérů

Praha 2018 **Tomáš Davídek**

Střední průmyslová škola stavební Josefa Gočára
Družstevní ochoz 3, Praha 4

Využití betonového kalu

Středoškolská odborná činnost

Konzultant: Ing. Jindřich Vorel, Ph.D.

Autor: Tomáš Davídek

Anotace

Tato práce středoškolské odborné činnosti se zabývá využitím betonového kalu na zpracování do stavebních kompozitů s eventuálním přídavkem různých vazných složek při technologických úpravách za různých podmínek v různých vzájemných poměrech. Dosažené pevnosti v tlaku normálně zrajících a hydrotermálně upravených vzorků byly korelovány se stupněm rekrystalizace původních směsí. Zjištěné poznatky umožní navrhnout technologii přípravy kompozitů, které budou dostatečné pevnosti v tlaku při nezanedbatelném obsahu betonového kalu.

Annotation

This essay of Students´ Professional Activities deals with the usage of concrete slurry for processing into building composite material with possible addition of dispersant under technological concrete finish with different conditions in different mutual proportions. Achieved strengths in the pressure of normally curing and hydro thermally adapted samples, so they were correlated with a degree of recrystallizing of original mixture. Obtained results will enable suggest technology of making composites which will be of sufficient firmness under pressure altogether with insignificant content of cement slurry.

Klíčová slova

Kompozit, betonový kal, hydrotermální aktivace, pojivové systémy, alkalická aktivace

Keywords

Composite, concrete slurry, hydrothermal activation, binder systems, alkali activation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci do středoškolské odborné činnosti vypracoval samostatně a všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Práce využití betonového kalu je z hlediska obsahu majetkem SPŠ stavební Josefa Gočára v Praze a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem ředitele SPŠ stavební Josefa Gočára se sídlem v Praze 4, Družstevní Ochoz 3.

V Praze dne 10. března 2018 Tomáš Davídek

Poděkování

Jsem velmi rád, že mohu touto cestou poděkovat řediteli SPŠ stavební J. G. Ing. Bc. Tomáši Langerovi za možnost provádět tuto práci v laboratořích školy, konzultantovi Ing. Jindřichu Vorlovi, Ph.D. za pomoc a užitečné rady a Ing. Davidu Kolouškovi, CSc. za technickou podporu při zjišťování mikrostrukturálního složení navrhovaných kompozitů.

Obsah

Úvod 1
1 Cíl práce 2
2 Teoretická část 3
2.1 Vodní sklo 3
2.2 Portlandský cement 4
2.3 Strusko-vápenatý cement 4
2.4 Strusko-alkalická pojiva 5
2.5 Kamenivo 5
3 Experimentální část 7
3.1 Suroviny pro zkoušky 7
3.1.1 Betonový kal 7
3.1.1.1 Mineralogické složení kalu 7
3.1.1.2 Granulometrické složení kalu 8
3.1.1.3 Chemický rozbor kalu 9
3.1.1.4 Vlhkost betonového kalu 9
3.1.1.5 Mikrostruktura cementu a kalu 10
3.1.2 Cement 12
3.1.3 Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska 12
3.1.4 Metakaolin 14
3.1.5 Aktivační přísady 14
3.1.5.1 Hydroxid sodný a draselný 15
3.1.5.2 Hydroxid vápenatý 15
3.1.5.3 Vodní sklo 15
3.1.5.4 Síran sodný 15
3.1.6 Kamenivo 15
3.1.7 Voda 16
3.2 Přípravy směsí pro výrobu zkušebních tělísek 17
3.2.1 Systémy z cementem 19
3.2.1.1 Kal, cement, kamenivo z laboratoře a voda 19
3.2.1.2 Voda, kal a cement 22
3.2.1.3 Kal, cement, kamenivo z výrobny u Mladé Boleslavi a voda 25
3.2.2 Systémy s metakaolinem 28
3.2.2.1 Kal, vodní sklo, metakaolin, hydroxid sodný a voda 28
3.2.3 Systémy se struskou 32
3.2.3.1 Kal, vysokopecní struska a voda 32

3.2.3.2 Kal, vysokopecní struska, hydroxid sodný a voda 33
3.2.3.3 Kal, vysokopecní struska, hydroxid draselný, vodní sklo a voda 35
3.2.4 Aktivace kalu hydroxidem sodným 37
3.2.4.1 Kal, hydroxid sodný a voda 37
3.2.5 Směsi s hydroxidem vápenatým 39
3.2.5.1 Kal, hydroxid vápenatý a voda 39
3.2.5.2 Kal, vodní sklo, hydroxid vápenatý a voda 40
3.2.5.3 Kal, vodní sklo, hydroxid draselný a hydroxid vápenatý a voda 40
3.2.5.4 Kal, vodní sklo, hydroxid sodný, hydroxid vápenatý a voda 42
3.2.5.5 Kal, hydroxid vápenatý, síran sodný a voda 47
3.2.6 Zkouška betonové kalu neupraveného a tepelně upraveného 49
3.2.6.1 Zkouška tepelně neupraveného betonové kalu a voda 49
3.2.6.2 Zkouška tepelně neupraveného betonové kalu s hydroxidem sodným a vodou 50
3.2.6.3 Zkouška tepelně neupraveného betonové kalu s hydroxidem vápenatým 51
3.2.6.4 Zkouška tepelně upraveného betonového kalu a voda 53
3.2.6.5 Zkouška tepelně upraveného betonové kalu s hydroxidem sodným 55
3.2.6.6 Zkouška tepelně upraveného betonové kalu s hydroxidem vápenatým 56
3.2.6.7 Zkouška a tepelně upravený kal ve směsi s hydroxidem Na a K při 550 °C 58
3.2.7 Zkouška směsi kalu a cihlářské hlíny 60
4 Vyhodnocení a možnosti využití kalu 63
4.1 Využití neupraveného kalu jako plniva 63
4.1.1 Betonový kal jako surovina při výrobě portlandského slinku 63
4.1.2 Betonový kal jako příměs do směsných cementů 63
4.1.3 Příměs betonového kalu při absenci jemných podílů v kamenivu 64
4.1.4 Využití betonového kalu jako glazury 64
4.1.5 Využití betonového kalu pro 3D tisk 64
4.1.6 Příměs kalu při výrobě keramiky 65
4.1.7 Příměs kalu při výrobě plynobetonu nebo plynosilikátu 65
4.2 Využití betonového kalu do pojivových systémů 65
4.3 Ekonomické vyhodnocení likvidace kalu (z roku 2016) 66
Závěr 68
Seznam literatury 70
Seznam tabulek 71
Seznam grafů 72
Seznam obrázků 72

Úvod

Betonový kal patří do skupiny druhotných surovin, které vznikají při čištění zařízení pro výrobu čerstvého betonu v různých stavebních provozech. Jeho částečné zpracování je v současné době řešeno použitím kalové vody (recyklované) jako záměsové při přípravě čerstvého betonu a obsah kalu se řídí hustotou této vody na hodnotě $\varrho = 1010$ kg/m³, tzn. 10 g kalu/1 litr vody. Při tomto množství se předpokládá její inertní působení v čerstvém betonu, co do množství, i složení [1–4; 8; 13]. Zařazením betonového kalu do směsí je možné nahradit absenci jemných podílů [0–0,25 mm] v kamenivu a zvýšit tak pevnosti, eventuálně vodo-nepropustnost zatvrdlého betonu [8; 10; 13]. Vzhledem ke složení – jemné podíly kameniva a cementu, kde existují ne-úplně zhydratovaná zrna je možné jádra těchto zrn využít k další hydrataci po předchozím rozrušení jejich hydratované slupky, ať chemicky, tepelně nebo mechanicky. Druhým aspektem je možnost použití vhodného pojiva, které stmelí zrna jemného kameniva za vytvoření dostatečně pevné struktury. [1–4; 6–8, 10; 12–14]

Aktuálním trendem je vytvoření kompozitu s minimálními energetickými nároky za využití již zmíněné druhotné suroviny betonového kalu a dosažení dobrých mechanických vlastností. Jak vyplývá z použité literatury – takovéto trendy existují. Očekávané aplikace různých složení jako kompozitu pro přípravu a zpevnění různých stavebních materiálů s dlouhodobou stabilitou za různých podmínek uložení. Podle dosavadních znalostí je zatím jen málo ověřených prací, které řeší tyto procesy týkající se uvedených směsí. Stabilita je kritickým parametrem pro jejich další využití. Jako každá chemická reakce, tak i stárnutí těchto směsí může být urychleno zvýšením teploty, což můžeme vyvolat například hydrotermálním ošetřením. Tato práce je soustředěna zejména na výzkum hydrotermální stability těchto systémů připravených i alternativním způsobem. Testování zkoumaných systémů připravených za hydrotermálních podmínek se jeví jako důležité pro porovnání procesů, které za normálních podmínek trvají léta. Tímto způsobem je možné získat výsledky o dlouhodobé stabilitě zkoušených kompozitů. [8; 13; 15]

V tomto příspěvku je též prezentována řada předběžných výsledků, které jsou součástí mého projektu na zjištění, užití betonového kalu do připravovaných kompozitních směsí na jiné bázi než cementové. Postupy, přípravy a formování směsí jsou popsány v této práci se snahou o docílení maximálního využití navrhovaných směsí za dosažení jejich dobrých mechanických vlastností. Získané zkušenosti se mohou stát podnětem pro další rozvoj aplikací podobných typů. [13; 15]

1 Cíl práce

Cílem mé práce je charakterizovat složení a vlastnosti kompozitů vyráběných převážně z druhotných surovin různými druhy aktivace ať již pomoci alkalických aktivátorů, nebo vlastní tepelnou úpravou druhotné suroviny a poté její zpevnění event. i za použití hydrotermálních podmínek v návaznosti na dosažené konečné tlakové pevnosti vzorků. Smyslem této práce je zdůraznit výhody a nevýhody použití popisovaných základních materiálů z různých zdrojů v České republice s ohledem na požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti připravovaných kompozitů.

Kromě pevnostních charakteristik je cílem této práce studovat pomocí moderní instrumentální techniky chemické a fázové složení těchto kompozitů jak ve formě amorfní tak i krystalické. Tento výzkum dává možnost soustředit se na výběr takových materiálů a technologií, kdy výsledkem syntézy bude kompozit o mikro-(nano) struktuře a vlastnostech analogických přírodním materiálům.

Při přípravě vzorků se jedná zejména o zaměření na složení a přípravu základních směsí, dále vliv nezvýšené teploty, hydrotermálního zpracování na fázové složení a na strukturu zatvrdlých materiálů. Ze zjištěných poznatků, jak navrhnout přípravu směsí, je určující zpracování druhotných surovin s cíleným zaměřením na využití druhotné suroviny a získání vlastností dle praktických potřeb uživatele. [15]

2 Teoretická část

Betonový kal patří mezi druhotné suroviny, není v dostatečné míře využíván a je vyvážen na skládky i přes to, že má své specifické složení srovnatelné s celou řadou dalších stavebních surovin, hmot a materiálů. Tato druhotná surovina má navíc i tu výhodu, že se jedná o velmi malé částice, které při použití ve stavebních procesech nutno velmi náročně získávat energeticky a mechanicky, dezintegrací těžených zemin. Samotné využití by se našlo nejenom v surovině samotné bez úpravy jako i v kombinaci s jinými složkami přídavkem vápenného hydrátu, nebo např. aktivací vodním sklem apod. Takto získané kompozity by mohly sloužit ve formě pojiva zrnitých materiálů při výrobě malt, solidifikačních směsí atd.

2.1 Vodní sklo

Vodní sklo (Na_2SiO_3) je koloidní roztok alkalických silikátů. Zpravidla se připravuje rozpouštěním alkalicko-silikátového skla, většinou sodného, ve vodě. Sodnosilikátové sklo se vyrábí sklářskou technologií, neboť se připravuje tavením směsi sestávající z křemičitého písku dostatečné čistoty a sody v kontinuální vanové peci při teplotě 1 400 °C. Sklovina, plynule vytékající z pece se zpravidla ochlazuje vodou.

Připravené sklo je čiré, úplně průhledné. Působením vzdušné vlhkosti na jeho povrchu vznikne šedobílý povlak produktů hydrolýzy. Ze zjištěné hodnoty je možno poměrně přesně určit složení sodnosilikátového skla. Sodnosilikátové sklo je ve vodě poměrně dobře rozpustné, avšak rychlost rozpouštějícího procesu je nízká. Rychlost rozpouštění se podstatně zvýší užitím vyšší teploty i tlaku (autoklávováním). Přechodová složka mezi pevným sklem a jeho vodným roztokem je tzv. hydratované vodní sklo.

a) Výroba z PKS/D (pevný křemičitan sodný/draselný) PKS/D se vyrábí ze sklářského písku (oxid křemičitý, 70–75 %) tavením ve sklářské vanové peci při teplotě 1 400–1 600 °C za pomoci alkalických tavidel – soda (uhličitan sodný) nebo potaš (uhličitan draselný), tj. látek, které tavení písku usnadňují.

Roztavená sklovina se prudce chladí za účelem rozpraskání na co nejmenší části (vizuálně podobné kouskům ledu) a tím se zajistí co nejjednodušší následné rozpouštění. Takto připravený vstupní materiál se pomocí hydroxidu sodného/draselného, vody, teploty a tlaku rozpouští v autoklávu (vytápěná, uzavíratelná tlaková nádoba) na tekuté vodní sklo. Tímto způsobem lze vyrábět všechny typy vodních skel.

b) Výroba hydrotermální reakcí se provádí v autoklávu (vytápěná, uzavíratelná tlaková nádoba) se za pomocí hydroxidu, vody, teploty a tlaku přímo rozpouští křemičitý písek. Touto metodou lze vyrábět jen určité typy vodních skel sodných.

Přidáváním organických či anorganických aditiv do procesu rozpouštění v autoklávu lze vylepšovat parametry a vlastnosti vodních skel.

Hydratované vodní sklo vytváří pevnou látku, obsahující 10 až 30 % rozpuštěného Na_2SiO_3. Je možno je připravit zahříváním práškového skla při 100 °C s malým množstvím vody. Vytvoří se průsvitná látka, snadno a rychle se rozpouštějící i ve studené vodě. Nejdůležitější a nejčastěji měřenou vlastností vodního skla je jeho hustota, která se pohybuje v hodnotách 37–42 Bé. [13]

2.2 Portlandský cement

Portlandský cement je nejvíce používaným druhem cementu při výrobě malty a betonu. Obsahuje směs oxidů kovů alkalických zemin vápníku, oxidy křemíku a hliníku. Portlandský cement je vyráběný pálením vápence (zdroj vápníku) s jílem a pískem (zdroj křemíku), čímž vzniká slinek, ke kterému se během procesu mletí přidává sádrovec jako regulátor tuhnutí.

Po interakci cementu s vodou nastává jeho hydratace, projevující se tuhnutím a tvrdnutím cementové pasty. Studium těchto procesů je velmi obtížné, neboť vznikají fáze, které se často vyznačují rentgenamorfní povahou, takže je není možno přesně stanovit tedy (blíže identifikovat). Pouze některé složky cementu jako například portlandit $Ca(OH)_2$, ettringit $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$ a další fáze se vyznačují krystalickými útvary, i když do jisté míry mohou vykazovat amorfní charakter. Mezi novotvary, vzniklé hydratací cementu, které jsou v převážné míře amorfní, zařazujeme vápenaté hydrosilikáty. [3–5; 6–8]

2.3 Strusko-vápenatý cement

Hlavní pojivovou složkou strusko-vápenatých cementů je C–S–H gel vedle menšího množství ettringitu respektive dalších vodnatých sulfoaluminátů. Rovněž vzniká hydro-granátová fáze případně další složky. Svými některými vlastnostmi se blíží struskosíranovému cementu. Tlaková pevnost normové malty po 28 dnech ošetření se pohybuje podle třídy strusko vápenatého pojiva od 5 do 20 MPa. Proteplováním do 90 °C se pevnost zvýší až na 30 MPa, autoklávováním na 50 MPa. Jeho použití je omezeno na přípravu betonů nízkých tříd hlavně pro podzemní konstrukce. [13]

2.4 Strusko-alkalická pojiva

Strusko alkalické betony (dále jen SAB) jsou kompozitní materiály, obsahující jemně mletou granulovanou vysokopecní respektive ocelářskou strusku o měrném povrchu kolem 300 m²/kg, aktivovanou roztokem sloučenin alkalických kovů. K tomu účelu se zpravidla používá alkalický uhličitan, hydroxid nebo silikát, který je nejvhodnější, a to v podobě vodního skla. Strusek lze použít z různých technologií, nejlépe však vyhovují granulované vysokopecní strusky o měrném povrchu 250–600 m²/kg. Pro přípravu SA pojiv je možno rovněž použít i vysokopecních strusek u odvalů, které jsou takto velmi často dlouhodobě skladovány. Je nezbytné jejich semletí na měrný povrch nad 400 m²/kg, nárůst pevností je však pomalejší i při užití vhodných aktivátorů.

Strusky ocelářské jsou pro přípravu SAB využívány v podstatě menší míře, jejich využití je zaměřeno hlavně na přípravu kameniva vhodné granulometrie. Jistou pozornost také zasluhují strusky z výroby feroslitin a barevných kovů, jelikož mohou příznivě ovlivnit některé fyzikálně-chemické i mechanické vlastnosti SAB. [8–13]

2.5 Kamenivo

Kamenivo do SAB nemusí být kvalitní, jako je tomu v případě betonů na bázi p-cementu. Obsah prachových podílů do 20 % a jílovitých složek do 5 % podstatněji neovlivňuje jejich použití pro SAB. Lze s výhodou využívat nestandardní materiály z místních zdrojů, což má značný ekonomický význam vzhledem k úspoře nákladů za dopravné. Není bezvýznamné využití řady pevných odpadů hutního průmyslu. Jedná se například o hlušinu z těžby rud a další sekundární suroviny nebo vybouraných vyzdívek z pecí.

Z dalších surovinových složek jsou velmi výhodné vysoko-křemičité úlety rentgen-amorfní povahy, které odpadají při výrobě ferosilicia a křemíku, vedle elektrárenských popílků.

Z vodního skla Na_2SiO_3 se uvolňují ionty Na^+, které působí na sklovinu strusky korozivními účinky, při nichž nastává výměna iontů $2Na^+$ a Ca^{2+}, způsobující narušení a posléze rozpad vazeb (–Si–O–Si–) skloviny. Současně nastává hydratace povrchových vrstev skloviny za vzniku kyseliny křemičité a alkalických silikátů. V okolním roztoku se postupně zvyšuje obsah iontu Ca^{2+} a Mg^{2+}, ze kterého přecházejí do pevného, semikrystalického stavu sloučeniny $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, $CaCO_3$ případně další. Na zrnkách strusky vzniklý vápenatý

hydro-silikátový gel zvolna reaguje s Ca^{2+} ionty v roztoku a lze předpokládat jeho dlouhodobou přeměnu v semikrystalickou fázi typu C–S–H II. [5; 8; 12]

3 Experimentální část

V začátku experimentální části je podrobně rozepsána pasáž rozboru zkoumané druhotné suroviny betonového kalu jak po stránce mineralogického složení, velikosti částic tak i chemický rozbor této suroviny. Dále jsou popsány suroviny pro provádění jednotlivých zkoušek, z nichž jsou zde uvedena klasická pojiva, a též různé druhy aktivačních přísad. V další části je pak uveden přehled různých druhů aktivací navrhovaných směsí včetně výsledků tlakových pevnostních zkoušek.

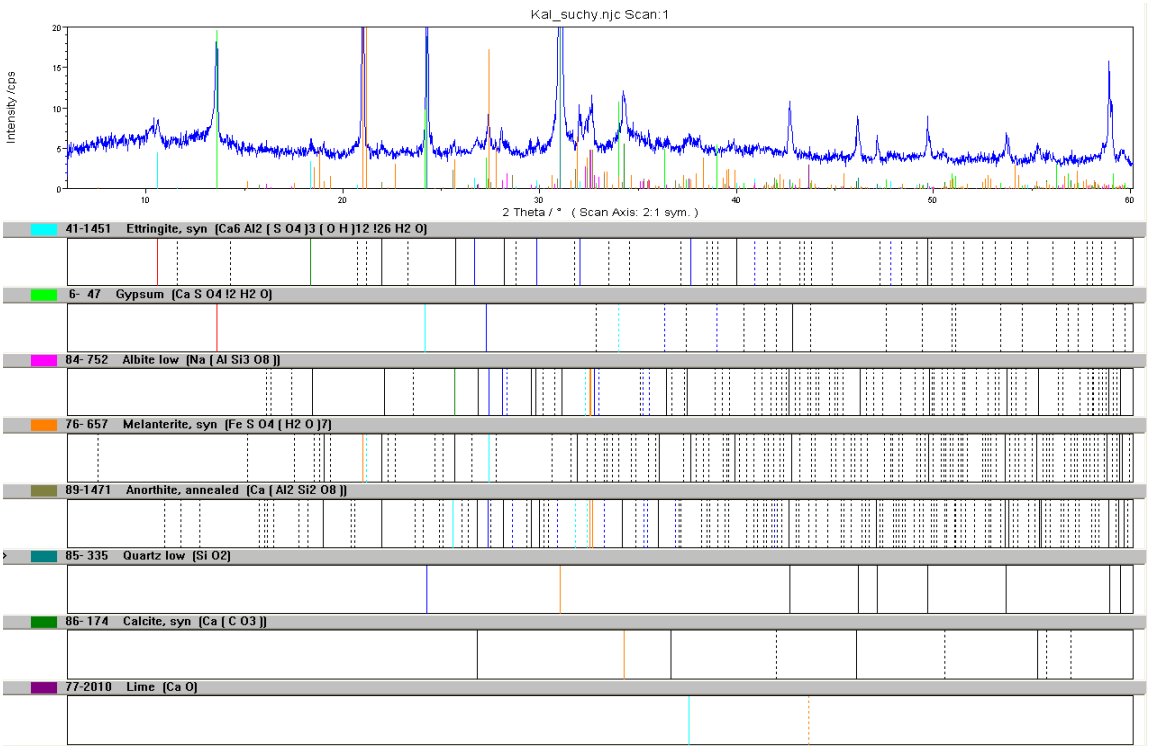
3.1 Suroviny pro zkoušky

Mezi základní suroviny, které byly používány pro testované směsi, betonový kal, cement, jemně mletá granulovaná vysokopecní struska, metakaolin, dále aktivační přísady NaOH event. KOH, $Ca(OH)_2$, vodní sklo Na_2SiO_3, síran sodný Na_2SO_4, kamenivo a voda.

3.1.1 Betonový kal

Betonový kal byl odebrán v cihelně Řepov u Mladé Boleslavi jako průmyslový odpad z výroby betonu. Kal byl silně alkalický a jeho pH se pohybovalo na hodnotě 13, což bylo zapříčiněno rozpuštěným portlanditem.

3.1.1.1 Mineralogické složení kalu



Obr. 1: RTG betonového kalu

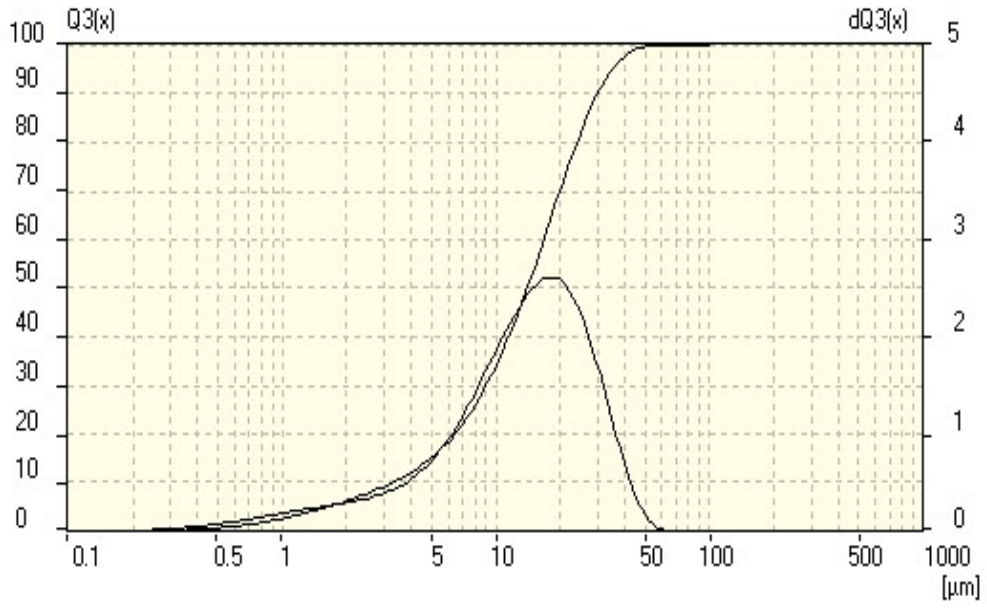
Zdroj: Vlastní šetření

Složení vzorku kalu je následující: vyskytují se zde krystalické fáze z cementu, jakož je sádrovec – regulátor tuhnutí a ettringit vznikající při zpomalování tuhnutí trikalcium aluminátu. Dále je zde melanterit, který pochází ze strusky a nakonec jemné částice kameniva (0–0,25 mm) což jsou živce (albit Na a anortit Ca) a křemen. Kalcit může být jednak z kameniva anebo je produktem karbonatace portlanditu vznikajícího při hydrataci cementu. Volné vápno pochází z výroby cementu jako nezreagovaný zbytek. Na tomto snímku je dále vidět velké amorfní haló po celé délce rentgenogramu, které odráží velký podíl gelových fází dlouho vláknitých CSH I. [9; 15]

3.1.1.2 Granulometrické složení kalu

Mean	Values...						
D43 =	15.61 µm	D42 =	9.9 µm	D41 =	4.91 µm	D40 =	2.61 µm
D32 =	6.28 µm	D31 =	2.76 µm	D30 =	1.44 µm		
D21 =	1.21 µm	D20 =	.69 µm				
D10 =	3.3 µm						

Statistical Means...			
Arithmetic Mean Diameter	15.606 µm	Variance	105.868 µm2
Geometric Mean Diameter	11.551 µm	Mean Squre Deviation	10.289 µm
Quadratic Square Mean Diameter	18.664 µm	Average Deviation	8.211 µm
Harmonic Mean Diameter	6.282 µm	Coefficiant of Variation	65.932 %
Statistical Modes...			
Skewness	.772	Mode	21.204 µm
Curtosis	.319	Median	14.021 µm
Span	1.896	Mean/Median Ratio	1.113
Uniformity	.58		
Specific Surface Area	9550.83 cm2/cm3		
Density	1. g/cc		
Form Factor	1. g/cc		



Graf 1: Granulometrické složení betonového kalu

Zdroj: Vlastní šetření

Z uvedeného grafu vyplývá, že dispergované částice, které obsahuje, se rozměrově pohybují od 0,5 do 50 µm. Je to tedy velmi jemný podíl částic srovnatelný s velikostí částic cementu.

3.1.1.3 Chemický rozbor kalu

Chemická analýza zkoušeného betonového kalu prováděná klasickým mokrým postupem a XRF analýza na spektrometru ARL 9400 je uvedena v následující tabulce č. 1:

Tabulka 1: Chemické složení betonového kalu.

Oxidy	Kal		Oxidy	Kal		Oxidy	Kal	
	hm.%	St. odch. hm.%		hm.%	St. odch. hm.%		hm.%	St. odch. hm.%
Na_2O	0,552	0,037	ZnO	0,042	0,010	I	<	
MgO	1,92	0,07	Ga_2O_3	<		CsO_2	<	
Al_2O_3	10,45	0,15	GeO_2	<		BaO	0,070	0,013
SiO_2	47,11	0,25	As_2O_3	<		HfO_2	0,0181	0,0067
P			SeO_2	<		Ta_2O_5	<	
P_2O_5	0,116	0,017	Br	<		WO_3	<2e	0,0025
SO_3	2,16	0,07	Rb_2O	<		Re_2O_7	<	
S			SrO	0,0270	0,0082	OsO_4	<	
Cl	0,0197	0,0070	Y_2O_3	<		IrO_2	<	
Ar	<		ZrO_2	0,0182	0,0068	PtO_2	<	
K_2O	1,36	0,06	Nb_2O_5	0,0083	0,0041	Au	<	
CaO	31,69	0,23	MoO_3	<		HgO	<	
Sc_2O_3	<		RuO_4	<		Tl_2O_3	<	
TiO_2	0,463	0,034	Rh_2O_3	<		PbO	0,0076	0,0038
V_2O_5	0,0299	0,0086	PdO	<		Bi_2O_3	<	
Cr_2O_3	0,0110	0,0053	Ag_2O	<		ThO_2	<	
MnO	0,078	0,014	CdO	<		U_3O_8	<	
Fe_2O_3	3,79	0,10	In_2O_3	<		PuO_2	<	
Co_3O_4	0,0084	0,0042	SnO_2	<		Am_2O_3	<	
NiO	0,0116	0,0054	Sb_2O_3	<				
CuO	0,048	0,011	TeO_2	<				

Poznámka: <znamená koncentrace <10 mg/kg (10 ppm)

<2e znamená hm. % <2 standardní odchylky

Zdroj: Vlastní šetření

3.1.1.4 Vlhkost betonového kalu

Vlhkost betonového kalu je velice proměnná, a měřením kalu v plastickém stavu bylo zjištěna vlhkost W = 132 hm% proto byl kal používán v suchém stavu s laboratorní vlhkostí.

$$W = \frac{m_z - m_s}{m_s} \times 100 \qquad W = \frac{76{,}3 - 32{,}8}{32{,}8} \times 100$$

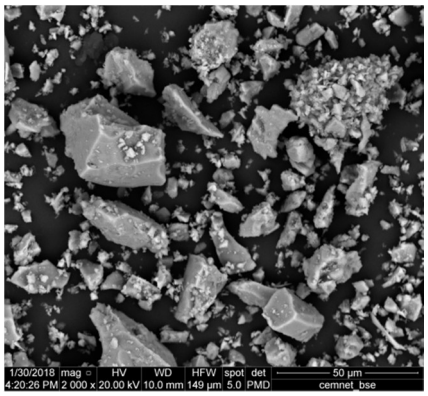
W = vlhkost [%]
m_z = hmotnost vlhkého vzorku [g]
m_s = hmotnost suchého vzorku [g]

3.1.1.5 Mikrostruktura cementu a kalu

Popis experimentu

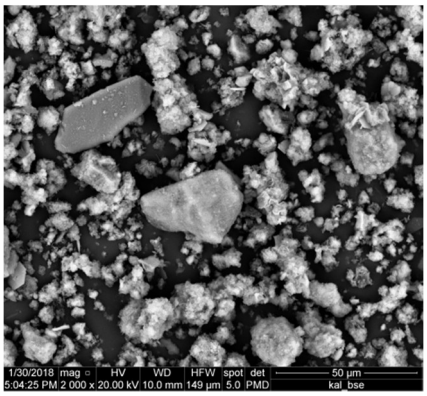
Na dokumentaci práškových vzorků (cement a kal), které byly nasypány a přilepeny na oboustranně lepící uhlíkovou podložku umístěnou na hliníkovém držáčku, byl použit skenovací elektronový mikroskop (SEM) (Quanta 450; FEI) doplněný energiově-disperzním spektrometrem (EDS) (ApolloX; EDAX) pro stanovení kvalitativní a kvantitativní analýzy. Snímky byly vytvořeny v režimu vysokého vakuu při napětí 20 kV, pro zobrazení "chemismu" byl použit detektor pro zpětně rozptýlené elektrony (BSE) (PMD, Centaurus).

Mikrostruktura cementu

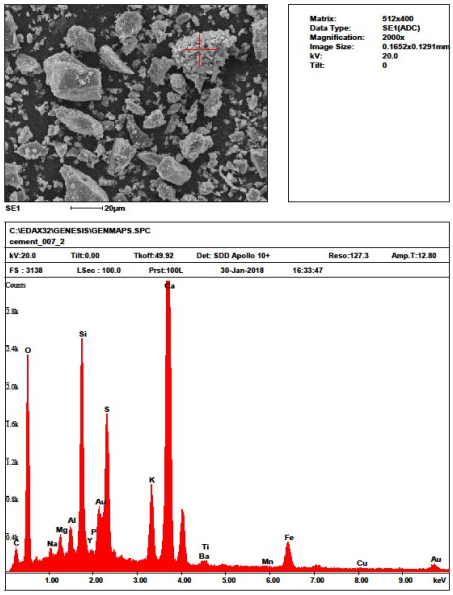


Na tomto obrázku jsou zřetelně vidět ostrohranná drcená zrna portlandského slinku tedy portlandský cement

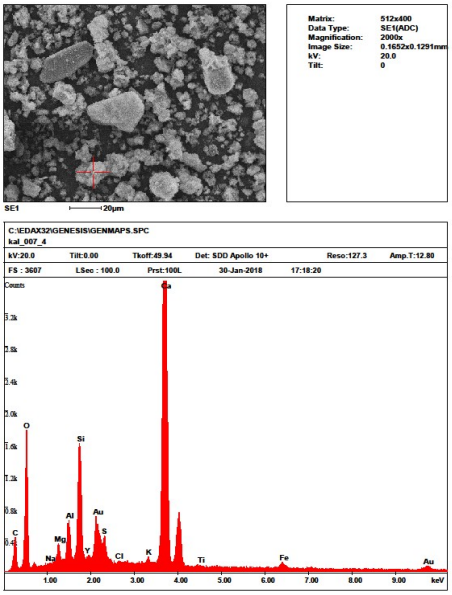
Mikrostruktura kalu



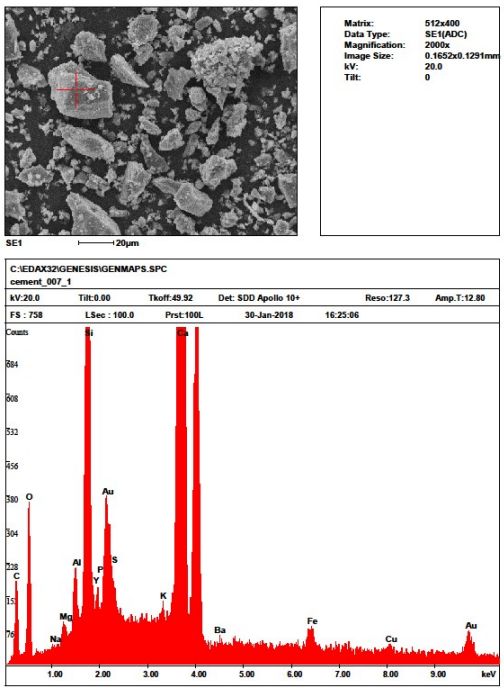
Na uvedeném obrázku jsou patrná zrna jemného kameniva, hydratovaného slinku a hexagonální krystaly portlanditu.



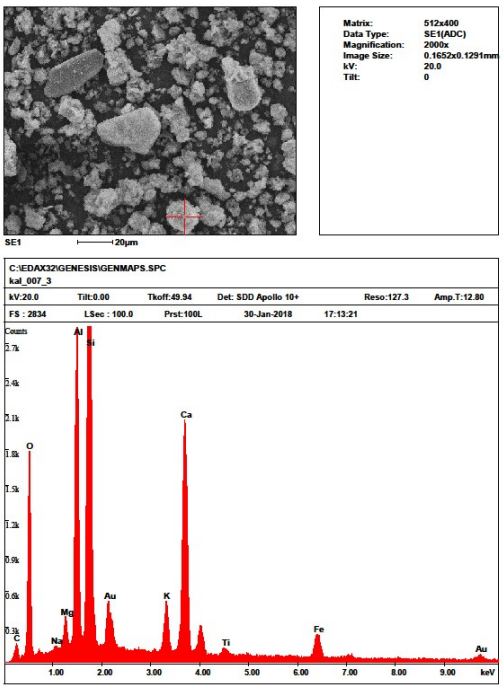
Shluk jemných zrn PC slinku a regulátoru tuhnutí sádrovce, což vychází z prvkového diagramu s majoritním zastoupením Ca, Si, S a O.



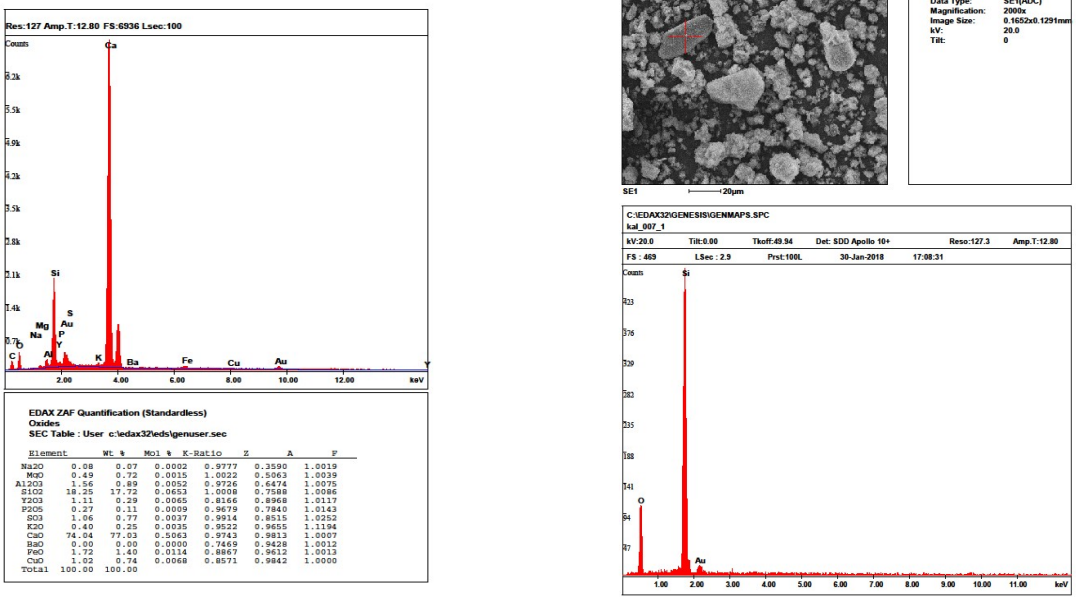
Prvkový rozbor zaměřeného zrna ukazuje na hydratovaný PC slinek - majoritní prvky Ca, Si a O.



Z rozboru vyplývá, že zrno je PC slinek.



Prvkový rozbor zrna je vápenatý živec anortit a jedná se o prvky Si, Al, Ca a O.



Zde vidíme orientační podíly oxidů, které korespondují se surovinou pro výrobu PC CaO 74 %, SiO_2 18 % Al_2O_3 1,7 % a FeO 1,7 %.

Prvkový rozbor zrna jednoznačně ukazuje na křemen SiO_2.

Obr. 2: Mikrostruktura cementu a kalu

Zdroj: Vlastní šetření

3.1.2 Cement

Používal jsem cement CEM I 42,5 R s měrným povrchem 320–380 m^2/kg. EN 197-1. Výrobce: Spenner Zementwerk Berlin [8]. Mikrostruktura cementu a jeho chemické složení je uvedeno na obrázku 2.

3.1.3 Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska

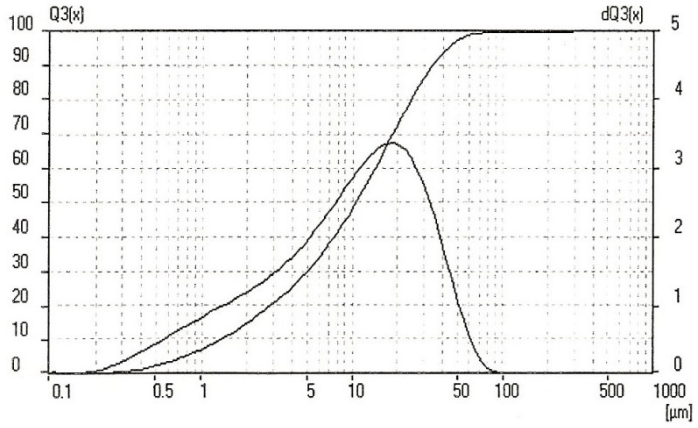
Při práci byla použita jemně mletá vysokopecní struska ze závodu KOTOUČ ŠTRAMBERK pod prodejním názvem – „Granulovaná vysokopecní struska MSJŠ – 16, velmi jemně mletá ve shodě s PN 72 2010 certifikovaná dle ČSN EN ISO 9002“. Původ vzorku – NH OSTRAVA. Granulometrické složení použité strusky je uvedeno v následujícím grafu. [8; 13]

Interpolation Values... C:\Program Files\a22___32\fritsch\micron-sizes.FPS

****** %	<=	0.100 µm	0.1 %	<=	0.200 µm	0.5 %	<=	0.300 µm
1.2 %	<=	0.400 µm	2.1 %	<=	0.500 µm	3.1 %	<=	0.600 µm
4.1 %	<=	0.700 µm	5.0 %	<=	0.800 µm	6.0 %	<=	0.900 µm
6.9 %	<=	1.000 µm	14.6 %	<=	2.000 µm	20.4 %	<=	3.000 µm
25.3 %	<=	4.000 µm	29.9 %	<=	5.000 µm	34.0 %	<=	6.000 µm
41.4 %	<=	8.000 µm	48.1 %	<=	10.000 µm	72.5 %	<=	20.000 µm
86.4 %	<=	30.000 µm	93.9 %	<=	40.000 µm	97.5 %	<=	50.000 µm
99.1 %	<=	60.000 µm	99.9 %	<=	80.000 µm	100.0 %	<=	100.000 µm
100.0 %	<=	200.000 µm	****** %	<=	300.000 µm	****** %	<=	400.000 µm
****** %	<=	500.000 µm	****** %	<=	600.000 µm	****** %	<=	800.000 µm

Interpolation Values... C:\Program Files\a22___32\fritsch\five-percent-steps.FPV

1.0 %	<=	0.372 µm	2.0 %	<=	0.487 µm	5.0 %	<=	0.796 µm
10.0 %	<=	1.368 µm	15.0 %	<=	2.072 µm	20.0 %	<=	2.923 µm
25.0 %	<=	3.927 µm	30.0 %	<=	5.030 µm	35.0 %	<=	6.256 µm
40.0 %	<=	7.602 µm	45.0 %	<=	9.044 µm	50.0 %	<=	10.621 µm
55.0 %	<=	12.337 µm	60.0 %	<=	14.231 µm	65.0 %	<=	16.320 µm
70.0 %	<=	18.700 µm	75.0 %	<=	21.453 µm	80.0 %	<=	24.663 µm
85.0 %	<=	28.637 µm	90.0 %	<=	33.918 µm	95.0 %	<=	42.440 µm
98.0 %	<=	52.105 µm	99.0 %	<=	58.439 µm	100.0 %	<=	134.700 µm



Graf 2: Granulometrické složení jemně mleté vysokopecní strusky

Zdroj: [15]

Pro hodnocení složení strusky byly navrženy různé moduly, které vyjadřují její vlastnosti, a tím i chování v různých pojivových systémech. K jejímu posouzení dle dalších faktorů, souvisejících s použitím v alkalicky aktivovaných hydratovaných systémech, slouží modul zásaditosti, který má základní význam pro posouzení hydraulických vlastností strusky. Námi použitá struska měla chemické složení:

Tabulka 2: Chemické složení strusky vyjádřené v oxidech

Struska mletá MSJŠ	m.j.	PN 72 2010	Obsahy složek v oxidech (%)	Složení použitého vzorku
CaO	%	26–45	37,53	39,05
MgO	%	4–15	12,96	12,74
SiO_2	%	25–45	40,34	39,10
Al_2O_3	%	4–15	5,54	6,73
Fe_2O_3	%	max. 1,5	0,27	0,40
SO_3	%	max. 3,0	0,57	0,24

Zdroj: [15]

Modul zásaditosti

$$Mz = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Zásadité strusky mají hodnotu Mz >1, kyselé mají hodnotu Mz <1. Jak z výše uvedeného vzorce a chemického složení našeho vzorku vyplývá, modul zásaditosti použité strusky má hodnotu Mz = 1,13, struska je tedy zásaditá, což je pro naše systémy výhodné, protože pracujeme v silně alkalickém prostředí. [15]

3.1.4 Metakaolin

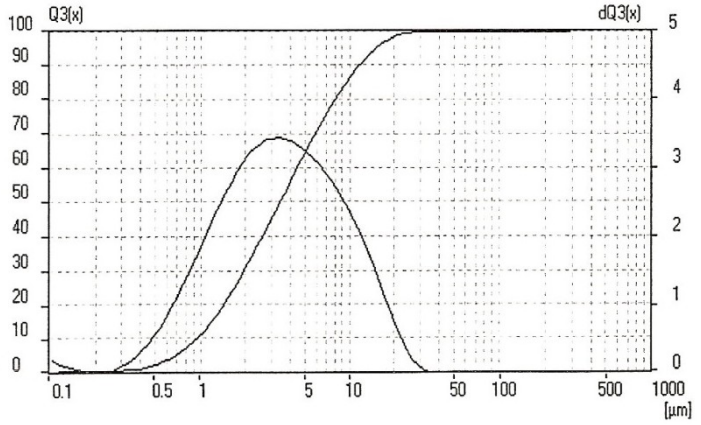
Metakaolin (MK) je pucolán vyrobený výpalem kaolínů v teplotním rozmezí 600–900 °C. Používaný metakaolin byl sedlecký (světlý) s měrným povrchem 30 000 m^2/kg. [15]

Interpolation Values... C:\Program Files\a22___32\fritsch\micron-sizes.FPS

****** %	<=	0.100 µm	0.5 %	<=	0.200 µm	0.7 %	<=	0.300 µm
1.2 %	<=	0.400 µm	2.2 %	<=	0.500 µm	3.6 %	<=	0.600 µm
5.3 %	<=	0.700 µm	7.1 %	<=	0.800 µm	9.0 %	<=	0.900 µm
11.0 %	<=	1.000 µm	30.6 %	<=	2.000 µm	45.3 %	<=	3.000 µm
56.0 %	<=	4.000 µm	64.3 %	<=	5.000 µm	70.6 %	<=	6.000 µm
79.8 %	<=	8.000 µm	86.1 %	<=	10.000 µm	98.3 %	<=	20.000 µm
99.9 %	<=	30.000 µm	100.0 %	<=	40.000 µm	100.0 %	<=	50.000 µm
100.0 %	<=	60.000 µm	100.0 %	<=	80.000 µm	100.0 %	<=	100.000 µm
100.0 %	<=	200.000 µm	****** %	<=	300.000 µm	****** %	<=	400.000 µm
****** %	<=	500.000 µm	****** %	<=	600.000 µm	****** %	<=	800.000 µm

Interpolation Values... C:\Program Files\a22___32\fritsch\five-percent-steps.FPV

1.0 %	<=	0.369 µm	2.0 %	<=	0.480 µm	5.0 %	<=	0.684 µm
10.0 %	<=	0.949 µm	15.0 %	<=	1.195 µm	20.0 %	<=	1.442 µm
25.0 %	<=	1.700 µm	30.0 %	<=	1.970 µm	35.0 %	<=	2.276 µm
40.0 %	<=	2.611 µm	45.0 %	<=	2.977 µm	50.0 %	<=	3.400 µm
55.0 %	<=	3.894 µm	60.0 %	<=	4.457 µm	65.0 %	<=	5.106 µm
70.0 %	<=	5.896 µm	75.0 %	<=	6.857 µm	80.0 %	<=	8.052 µm
85.0 %	<=	9.591 µm	90.0 %	<=	11.738 µm	95.0 %	<=	15.172 µm
98.0 %	<=	19.210 µm	99.0 %	<=	21.963 µm	100.0 %	<=	48.000 µm



Graf 3: Granulometrické složení sedleckého kaolinu I A

Zdroj: [15]

3.1.5 Aktivační přísady

Jako aktivační přísady byly používány roztoky hydroxidů alkalických kovů (10–15 M), a to zejména hydroxid sodný, eventuelně v kombinaci s hydroxidem draselným. Silně alkalické prostředí (pH >13) je nutné pro reakční procesy alkalické aktivace. Vzhledem k nízké ceně bude jejich dostupnost použití optimální. Pro naše kompozity byly používány

tyto hydroxidy jakosti technické, event. chemicky čisté, což plně postačovalo pro naše použití. Do kompozitů byly přidávány formou roztoků v kapalné složce směsi. [11]

3.1.5.1 Hydroxid sodný a draselný

Hydroxid sodný NaOH neboli louh je silně zásaditá anorganická aktivační látka přidávaná do směsí/roztoků pro zvýšení alkality roztoku. Používaný hydroxid sodný pro zkoušky byl technický. [15]

3.1.5.2 Hydroxid vápenatý

Hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ je zásaditá anorganická aktivační látka přidávaná do směsí/roztoků pro zvýšení alkality roztoku. Používaný hydroxid pro zkoušky byl technický. Název výrobku: Bílý vápenný hydrát EN 459-1 CL 90-S. Výrobce: CARMEUSE CZECH REPUBLIC s r. o. Mokrá 359, 664 04 Mokrá, závod vápenka Mokrá. [3]

3.1.5.3 Vodní sklo

Vodní sklo Na_2SiO_3 je zásaditá aktivační látka s obsahem amorfního SiO_2. Distributor: BARVY A LAKY HOSTIVAŘ a.s. Průmyslová 1472/11, 102 19, Praha 10, ČR.

3.1.5.4 Síran sodný

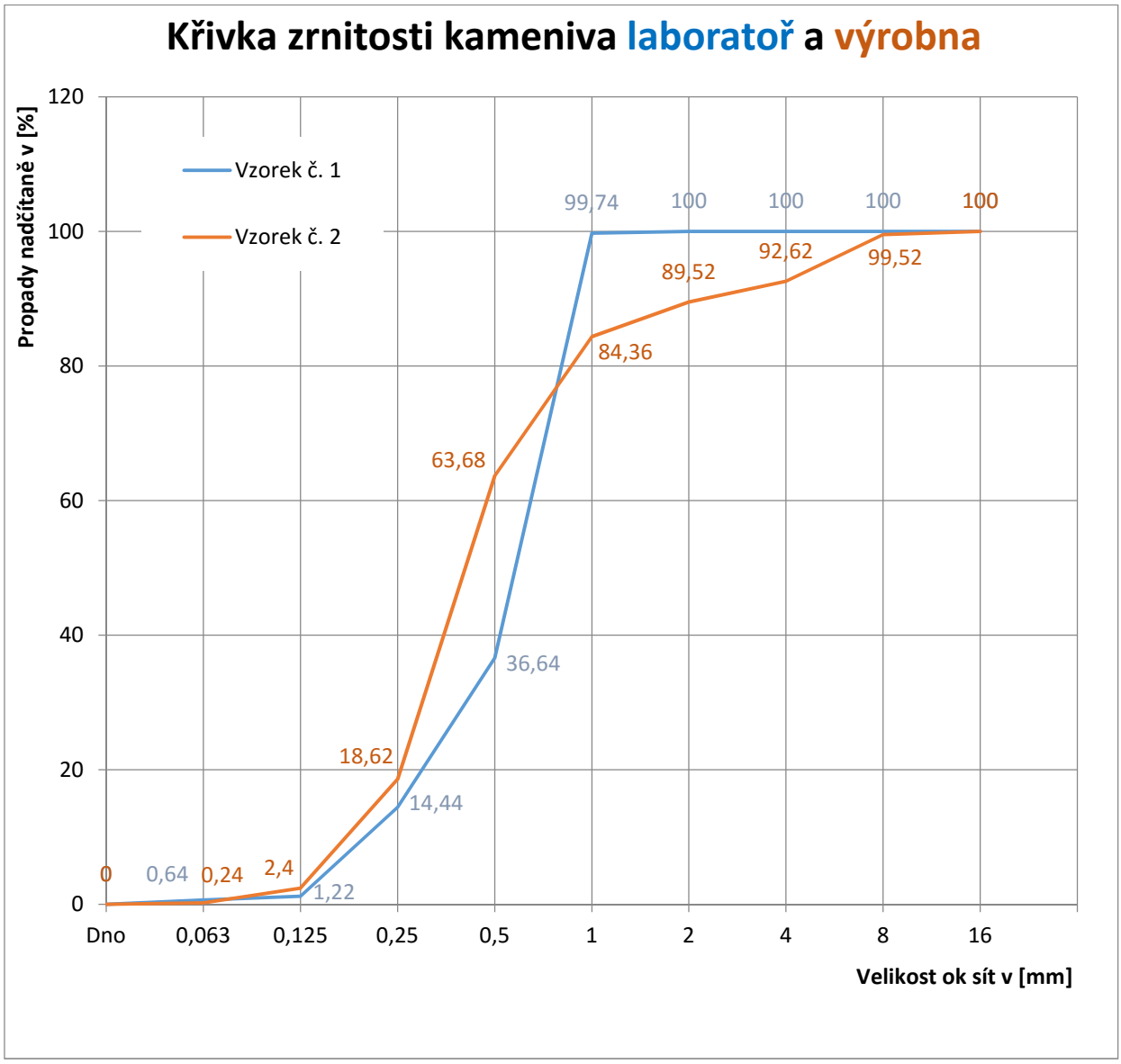
Síran sodný Na_2SO_4 je aktivační látka s obsahem síranových aniontů s možností aktivace hlinitanových složek zejména z portlandského cementu.

3.1.6 Kamenivo

Použité kamenivo pro zkoušky byl křemičitý písek frakce 0,5–1 mm z laboratoře a dále drobné kamenivo z cihelny Řepov.

Tabulka 3: Kamenivo z laboratoře a z cihelny Řepov pro zkoušky směsí

Velikost ok sít	Zbytky na sítech v						Propad sítem	
[mm]	[g]		[%]		[%] Nadčítaně			
16,000	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
8,000	0,0	2,4	0,00	0,48	0,00	0,48	100,00	99,52
4,000	0,0	34,5	0,00	6,90	0,00	7,38	100,00	92,62
2,000	0,0	15,5	0,00	3,10	0,00	10,48	100,00	89,52
1,000	1,3	25,8	0,26	5,16	0,26	15,64	99,74	84,36
0,500	315,5	103,4	63,10	20,68	63,36	36,32	36,64	63,68
0,250	111,0	225,3	22,20	45,06	85,56	81,38	14,44	18,62
0,125	66,1	18,1	13,22	16,22	98,78	97,60	1,22	2,40
0,063	2,9	10,8	0,58	2,16	99,36	99,78	0,64	0,24
Dno	3,2	1,2	0,64	0,24	100,00	100,00	0,00	0,00



Graf 4: Použité kamenivo pro zkoušky

Zdroj: Vlastní šetření

3.1.7 Voda

Záměsová voda byla používána z vodovodního řadu, a to jako hydratační a reologická pro zajištění vhodné konzistence připravovaných směsí jakož i při hydrotermálním zpracování vzorků v autoklávech.

3.2 Přípravy směsí pro výrobu zkušebních tělísek

Vzhledem ke zkoumanému materiálu, „betonový kal“, jehož parametry jsou uvedeny v kapitole 3.1.1, jsem si rozdělil zkoušky do několika základních skupin a při jejich provádění jsem vycházel z níže uvedených předpokladů, které jsem si poté v praxi postupně ověřoval.

Jedna z variant byla využití betonového kalu bez úprav do různých surovinových směsí, kde jsem vycházel z mineralogického složení, granulometrie a chemického složení. Dále jako příměs pro zlepšení některých jejich charakteristik s tím, že hlavním motivem bude vždy dosažená tlaková pevnost zkoumaných kompozitů.

Z dalšího možného využití jsem předpokládal, že hydratovaná zrna cementu jsou obalena hydratační vrstvou, která se skládá z hydratovaných slinkových minerálů alitu C_3S a belitu C_2S za vzniku gelu CSH II, CSH I, krystalického minerálu portlanditu $Ca(OH)_2$, a dalších forem krystalických hydratovaných fází aluminátových a alumináto-feritových. V tomto ohledu jsem předpokládal, že hydratace slinkových minerálů neproniká až do jádra větších cementových zrn a porušením této obálky vhodnými metodami se obnaží nezhydratované jádro cementových zrn a tím „probuzení – obnovení“ další hydratace.

V další fázi zkoušek jsem zaměřil na možnost obalení jednotlivých zrn jemného kameniva a hydratovaných zrn cementu silně zásaditým aktivačním geopolymerním aktivátorem skládajícím se z roztoku hydroxidu sodného nebo draselného a sodného vodního skla v návaznosti na vytvoření alkalicko-křemičité obálky na všech zrnech betonového kalu a tím docílit zpevnění zkoumaného kompozitu. S další možností vylepšení parametrů směsi jsem řešil přídavkem portlanditu, tedy $Ca(OH)_2$ jako náhradu pro výměnu jednomocných iontů Na^+, K^+, H^+) za ionty Ca^{2+}, přičemž se koloidní zrna jemných podílů přiblíží (Ca-můstky), zmenší se tím jejich lyosféra (vodní film) a vytvoří se agregovaná struktura. [10]

A jako poslední z možných úprav betonového kalu jsem zvažoval jeho tepelnou úpravu, v peci na hodnotu 800 °C, čímž jsem předpokládal jeho tepelné narušení, a tím jeho možnou aktivaci.

Z možných variant jsem se ještě pokusil použít betonový kal do směsí s jílem, a tuto směs vypálit v peci. Kal sice nemá tak dobrou vaznost jako jíl, ale domnívám se, že v určitém množství by jej mohl nahradit. Vzhledem k většímu obsahu prvků alkalických kovů, a kovů alkalických zemin, které jsou patrny z rozborů uvedených na obrázku 1 a 2 a z tabulky 1, je jejich obsah dostatečný na zlepšení struktury vypáleného keramického výrobku. Zjištěné

minerály na bázi živců v této směsi působí jako tavivo, a tím by mohla být snížena teplota výpalu, což by se projevilo v úspoře paliva. Přídavek taviv dále zvyšuje soudržnost připravené směsi, její hutnost, což souvisí i s vyšší pevností, nižší pórovitostí atd. Betonový kal má i vhodnou zrnitost viz graf 1 a není jej tedy nutno upravovat a možno zapracovat do směsi z jílem ve stávajícím stavu.

3.2.1 Systémy z cementem

Systémy s cementem zahrnovaly reakce (kal, kamenivo a cement) a (cement, kal) současně byl také vyzkoušen vzorek s pískem frakce 0–4 mm a z výrobny Řepov u Mladé Boleslavi, která dodala na zkoušku betonový kal. Provádění zkoušek bylo prováděno za normálního zrání a též při hydrotermální úpravě. Současně byly sledovány změny ve struktuře kompozitů a pevnostní tlakové charakteristiky směsí. Následně je uvedeno složení a příprava jednotlivých směsí.

3.2.1.1 Kal, cement, kamenivo z laboratoře a voda

Abych mohl zkoumat vlastnosti směsí v tlaku, musel jsem vytvořit vzorky ve tvaru krychle a=20 mm. Pro vytvoření požadované konzistence jsem při těchto zkouškách používal vodu z vodovodu tedy nezávadnou. Kal vždy přidáváme vysušený v pevném skupenství, ne v tekutém, v jakém ho uchováváme. To znamená, že kal vždy před pokusem necháme minimálně 24 hodin sušit rozprostřený na plechu. Kal se nesmí přidávat jako příměs v mokrém stavu, protože u něj nelze určit přesně jeho navážka (velmi proměnné množství vody) viz kapitola 3.1.1.4, a musí být tedy vysušený na laboratorní vlhkost.

Pracovní postup

Do nádoby jsem si přesně navážil cement (C) a kamenivo (K). Voda (V) se nepočítala a přidávala se na správnou konzistenci směsi. Tyto tři složky, jejichž poměry jsou uvedeny v tabulce č. 4, jsem řádně promíchal, vpravil do forem vytvořil vzorky o objemu 8 cm^3 a nechal zatvrdnout 24 hodin. Poté jsem krychle vyjmul a umístil je do exikátoru s vlhkým prostředím na dobu 24 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 5. Z tabulky č. 5 vychází grafy č. 5 a 6.

Tabulka 4: Složky směsí a procentuálních poměrů kameniva a kalu

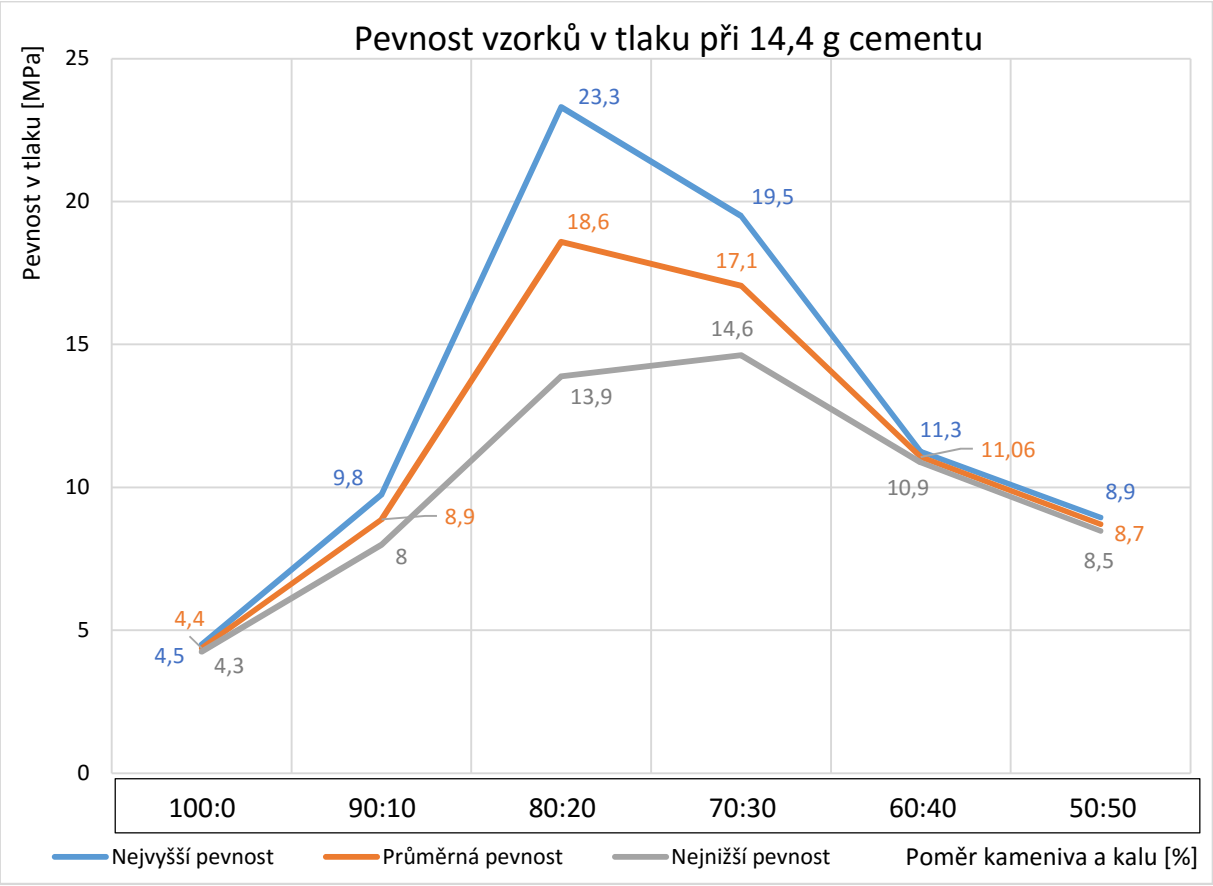
Pokus č.	Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek směsi [g]				Poměr kameniva a kalu [%]	
		Cement	Voda	Kamenivo	Kal	Kamenivo	Kal
1	1	14,4	Dle konzistence	39,9	–	100	0
	2	–		–	–	–	–
2	1	–		–	–	–	–
	2	28,8		24,8	0,0	100	0
3	1	14,4		22,3	2,5	90	10
	2	28,8					
4	1	14,4		19,8	4,7	80	20
	2	28,8					
5	1	14,4		17,4	7,4	70	30
	2	28,8					
6	1	14,4		14,9	9,9	60	40
	2	28,8					
7	1	14,4		12,4	12,4	50	50
	2	28,8					

Poznámka: Při 1. a 2. zkoušce měl vzorek málo jemné frakce, vznikla pórovitá struktura s minimální soudržností, a proto se nevyráběl vzorek č. 2.

Tabulka 5: Tabulka pevností jednotlivých vzorků

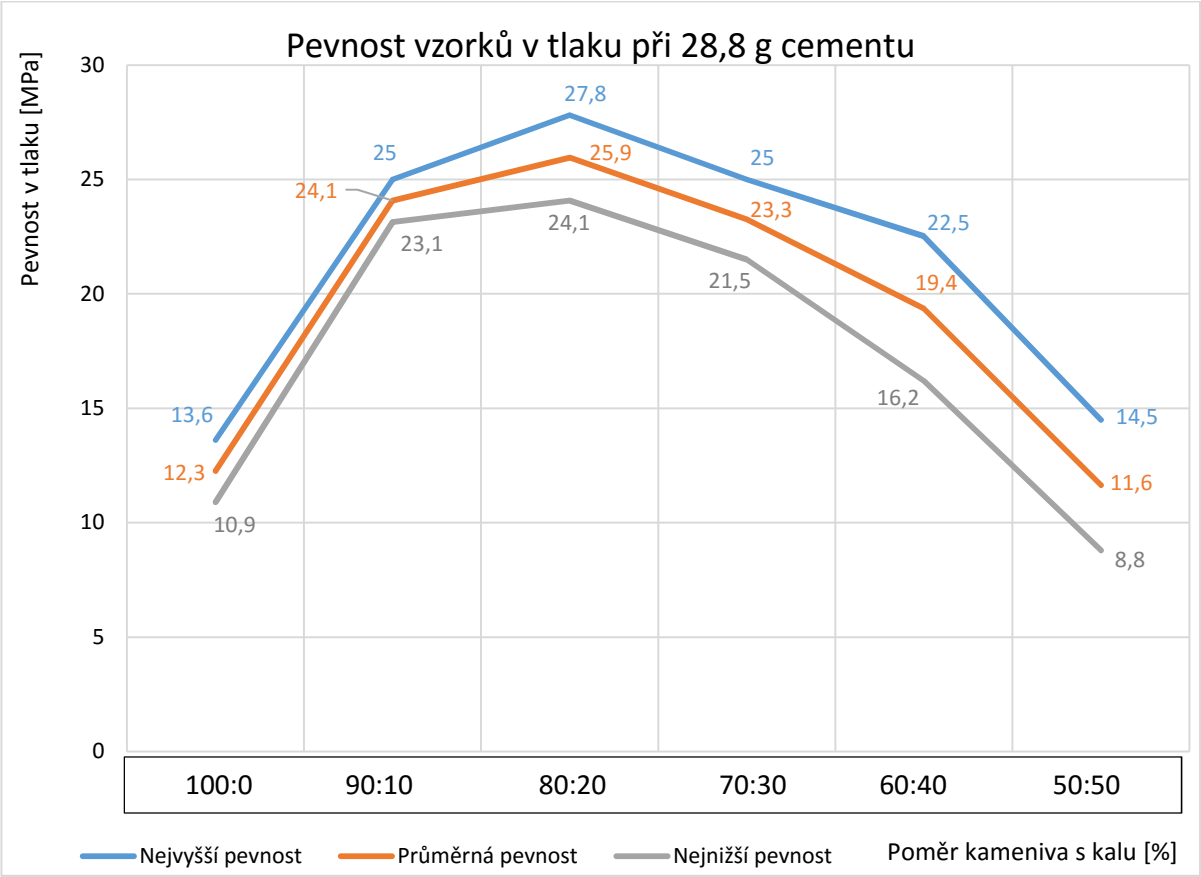
Pokus č.	Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa] systém cement, kamenivo a kal		
		Nejnižší	Průměrná	Nejvyšší
1	1	4,3	4,4	4,5
	2	–	–	–
2	1	–	–	–
	2	10,9	12,3	13,6
3	1	8,0	8,9	9,8
	2	23,1	24,1	25,0
4	1	13,9	18,6	23,3
	2	24,1	25,9	27,8
5	1	14,6	17,1	19,5
	2	21,5	23,3	25,0
6	1	10,9	11,1	11,3
	2	16,2	19,4	22,5
7	1	8,5	8,7	8,9
	2	8,8	11,6	14,5

Poznámka: Pokus č. 1 a 2 nemá 2. vzorek, tudíž nelze spočítat průměrnou hodnotu z 2 vzorků.



Graf 5: Pevnosti vzorků 1 s obsahem 14,4 g cementu

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 6: Pevnosti vzorků 2 s obsahem 28,8 g cementu

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.1.2 Voda, kal a cement

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a cement, který byl navyšován do směsi vždy po 20 %. 100 % cementu je 16,1 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah cementu a kalu na směs s přidáním vody v konstantním množství a jak se mění její vlastnosti. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadná).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech vzorků byl obdobný jako v kapitole 3.2.1.1 s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a cement v jiném poměru.

Do nádoby jsem navážil suché složky, tedy cement (C), betonový kal (K) a vodu přidal dle konzistence. Nakonec jsem směs důkladně zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Polovina vzorků byla po vyjmutí z forem ponechána v exikátoru a polovina vzorků byla vložena do nádoby s vodou do sušárny a zahřáta na 60 °C na 16 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 7. Z tabulky č. 7 vychází graf č. 7.

Tabulka 6: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a cementu

Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]			Poměr kalu a cementu [%]	
	Voda	Cement	Kal	Cement	Kal
1	Dle konzistence	0,0	16,1	0	100
2		3,2	12,9	20	80
3		6,4	9,7	40	60
4		9,7	6,4	60	40
5		12,9	3,2	80	20
6		16,1	0,0	100	0

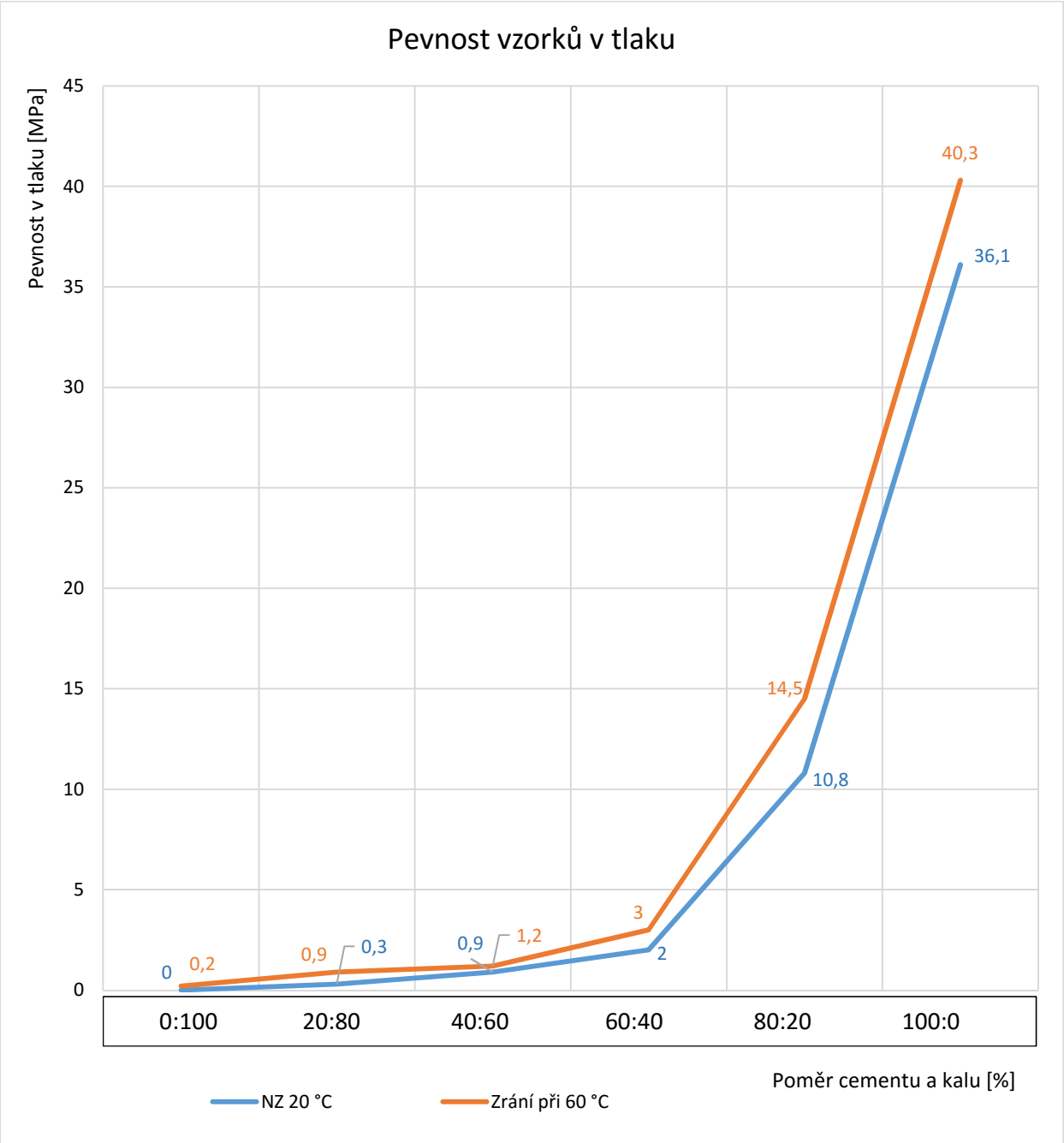
Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 7: Tabulka pevností jednotlivých vzorků

Pokus č.	Pevnost v tlaku [MPa] systém cement a kal	
	NZ 20 °C	Zrání při 60 °C
1	0,0	0,2
2	0,3	0,9
3	0,9	1,2
4	2,0	3,0
5	10,8	14,5
6	36,1	40,3

Zdroj: Vlastní šetření

Poznámka: Vzorek u 1. pokusu se v nádobě v sušárně při 60 °C rozpadl.



Graf 7: Pevnosti vzorků v poměru cementu a kalu za různých teplot

Zdroj: Vlastní šetření

Z grafu č. 7 vyplývá, že zvýšení pevnosti v tlaku závisí na množství cementu a různé teplotě zrání. Kal se na pevnosti v tlaku nepodílel.

3.2.1.3 Kal, cement, kamenivo z výrobny u Mladé Boleslavi a voda

Pro porovnání vlastností jsem provedl zkoušky pevnosti v tlaku na směsích obsahujících kal, cement, kamenivo ze závodu Řepov a vody, přičemž kal a kamenivo bylo v poměru. Tento kompozit je velmi podobný 3.2.1.1, přičemž hlavní rozdíl je v poměrech, zde jsou poměry od 0–100 %.

Pracovní postup

Do nádoby jsem si přesně navážil cement (C) a kamenivo (K). Voda (V) se nepočítala a přidávala na správnou konzistenci směsi. Tyto tři složky, jejichž poměry jsou uvedeny v tabulce č. 8, jsem řádně promíchal, vpravil do forem, vytvořil vzorky o objemu 8 cm^3 a nechal zatvrdnout po dobu 24 hodin. Poté jsem krychle vyjmul a umístil je do exikátoru s vlhkým prostředím na dobu 24 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 9. Z tabulky č. 9 vychází grafy č. 8.

Tabulka 8: Složení směsi z kamenivy cihelny Řepov

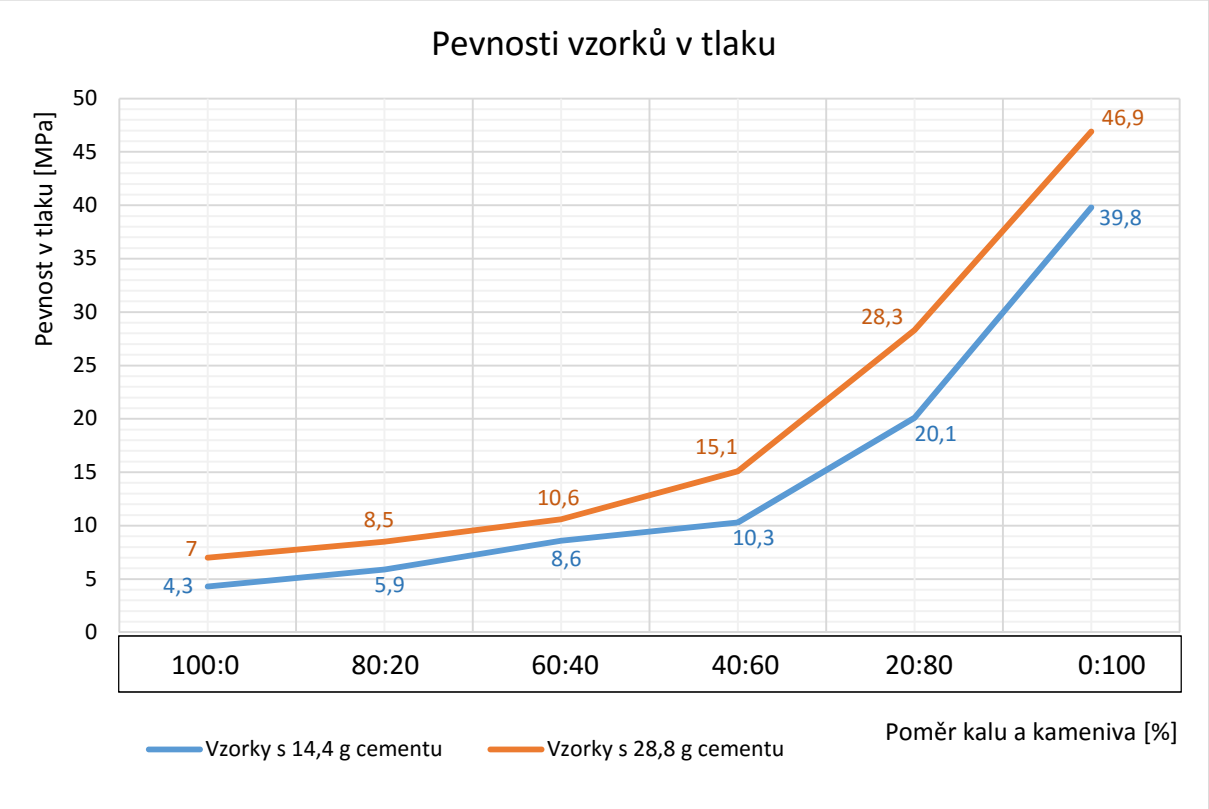
Pokus č.	Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek směsi [g]				Poměr kameniva a kalu [%]	
		Cement	Voda	Kamenivo	Kal	Kamenivo	Kal
1	1	14,4	Dle konzistence	24,8	0,0	100	0
	2	28,8					
2	1	14,4		19,8	5,0	80	20
	2	28,8					
3	1	14,4		14,9	9,9	60	40
	2	28,8					
4	1	14,4		9,9	14,9	40	60
	2	28,8					
5	1	14,4		5,0	19,8	20	80
	2	28,8					
6	1	14,4		0,0	24,8	0	100
	2	28,8					

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 9: Tabulka pevností vzorků v tlaku

Pokus č.	Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	1	4,3
	2	7,0
2	1	5,9
	2	8,5
3	1	8,6
	2	10,6
4	1	10,3
	2	15,1
5	1	20,1
	2	28,3
6	1	39,8
	2	46,9

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 8: Pevnosti betonu z kameniva z cihelny Řepov a kalu

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 10: Složení směsi (kamenivo a kal) z cihelny Řepov upravené složení.

Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]		Poměr kameniva a kalu [%]	
	Kamenivo	Kal	Kamenivo	Kalu
1	39,9	0,0	100	0
2	37,9	2,0	95	5
3	35,9	4,0	90	10
4	33,9	6,0	85	15
5	31,9	8,0	80	20
6	29,9	10,0	75	25

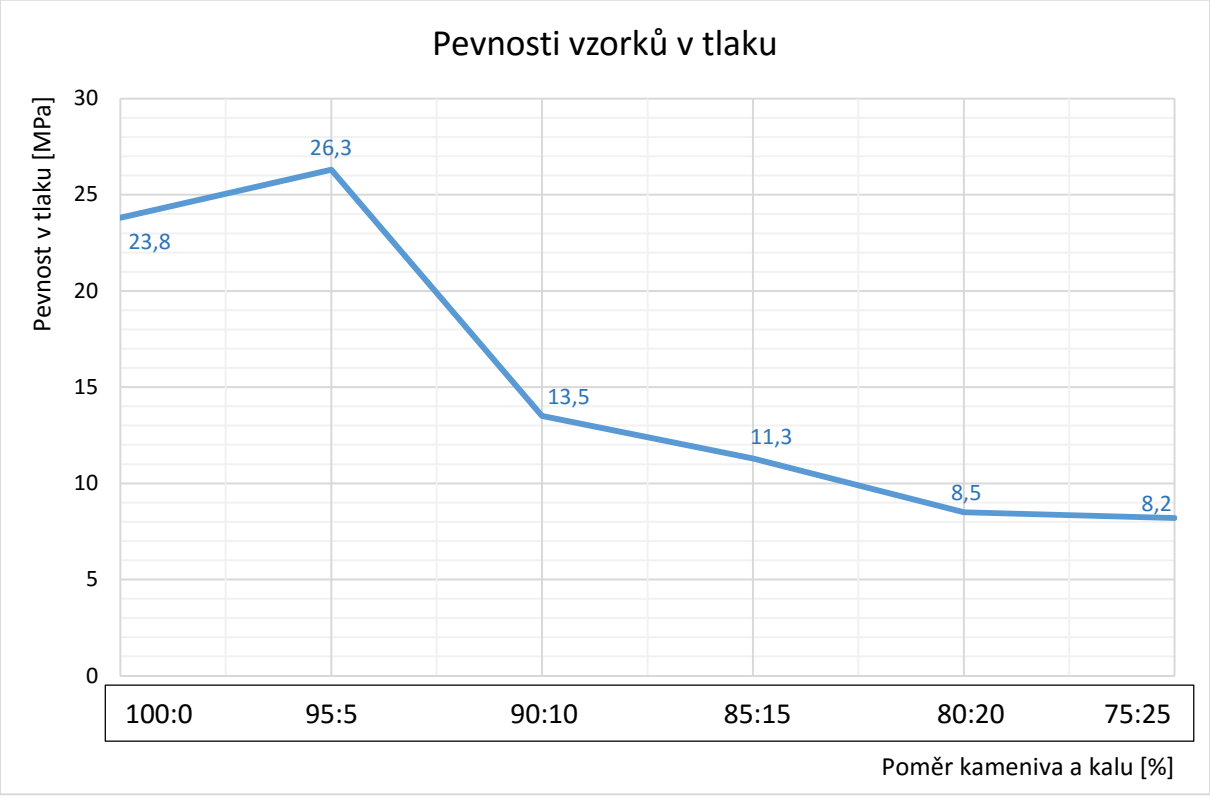
Zdroj: Vlastní šetření

Poznámka: Cement 28,8 g a voda jsou stejné jako ve směsi č. 3.2.1.1

Tabulka 11: Pevnosti v tlaku připravených směsí

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	23,8
2	26,3
3	13,5
4	11,3
5	8,5
6	8,2

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 9: Pevnosti při upraveném jemnějším složení směsi

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.2 Systémy s metakaolinem

Systémy s metakaolinem byly zkoušeny obdobně jako s cementem, tzn. s přídavkem MK, betonového kalu, hydroxidu sodného, vodního skla a vody. Tato směs byla aktivována a jedním z nejdůležitějších aktivátorů byl křemičitan sodný, který sám o sobě již vytváří spojováním zrn pevnou strukturu.

3.2.2.1 Kal, vodní sklo, metakaolin, hydroxid sodný a voda

Pro porovnání vlastností jsem provedl zkoušky pevnosti v tlaku na směsích obsahujících kal a metakaolin v různých procentuálních poměrech. Každý vzorek byl vyroben z 16,1 g suché složky, tedy kalu a metakaolinu v určitém poměru, vody, hydroxidu sodného a vodního skla. Hmotnostním poměrem kalu a metakaolinu se rozumí procentuálního množství daného materiálu v suché směsi. 100 % suché směsi se rovná 16,1 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv obsah kalu na vzorky, zdali se zvyšuje její pevnost v tlaku, a jak se mění její vlastnosti. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup č. 1 (60 °C ve vlhku)

Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu sodného NaOH a přidal vodu H_2O. Obě složky jsem řádně zamíchal, a tím se hydroxid sodný zcela rozpustil. Následně jsem přidal vodní sklo Na_2SiO_3 a nakonec jsem kapalnou směs nalil do nádoby, kde byla připravená suchá složka, tedy kal (K) a metakaolin (MK). Suchou složku bylo třeba řádně promíchat, neboť se tvořily hrudky. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin v sušárně při 60 °C zabalený v igelitu z důvodu vlhkosti. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 13. Z tabulky č. 13 vychází graf č. 10.

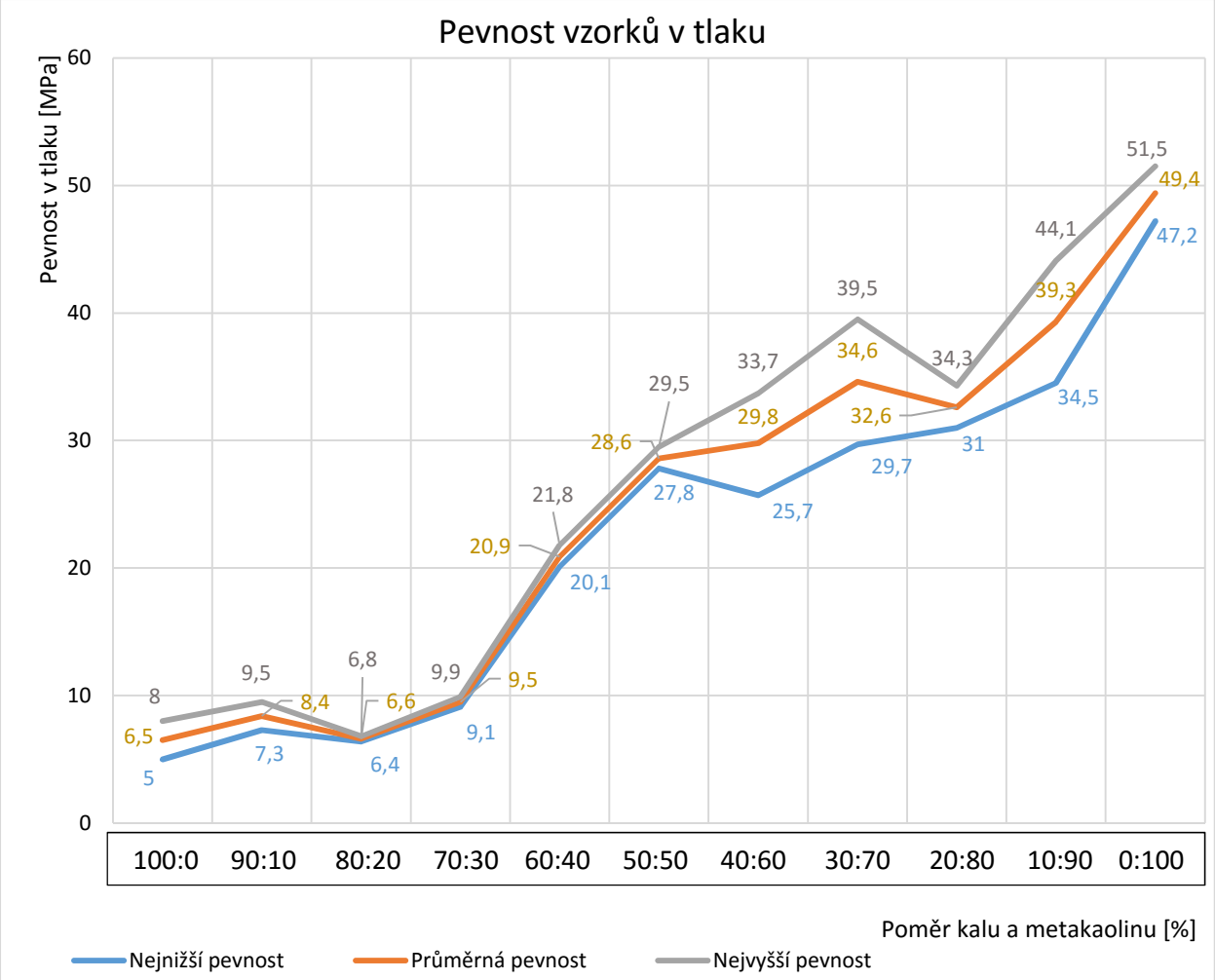
Tabulka 12: Složky směsí a procentuálních poměrů metakaolinu a kalu

Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek směsi [g]					Poměr kalu a metakaolinu [%]	
	Hydroxid sodný	Voda	Vodní sklo	Kal	Metakaolin	Kal	Metakaolin
1	2,3	Dle konzistence	11,5	16,1	0,0	100	0
2				14,5	1,6	90	10
3				12,9	3,2	80	20
4				11,3	4,8	70	30
5				9,7	6,5	60	40
6				8,1	8,1	50	50
7				6,5	9,7	40	60
8				4,8	11,3	30	70
9				3,2	12,9	20	80
10				1,6	14,5	10	90
11				0,0	16,1	0	100

Tabulka 13: Tabulka pevností vzorků kal a metakaolin

Pokus č.	Pevnost v tlaku [MPa] kal a metakaolin při 60 °C		
	Nejnižší	Průměrná	Nejvyšší
1	5,0	6,5	8,0
2	7,3	8,4	9,5
3	6,4	6,6	6,8
4	9,1	9,5	9,9
5	20,1	20,9	21,8
6	27,8	28,6	29,5
7	25,7	29,8	33,7
8	29,7	34,6	39,5
9	31,0	32,6	34,3
10	34,5	39,3	44,1
11	47,2	49,4	51,5

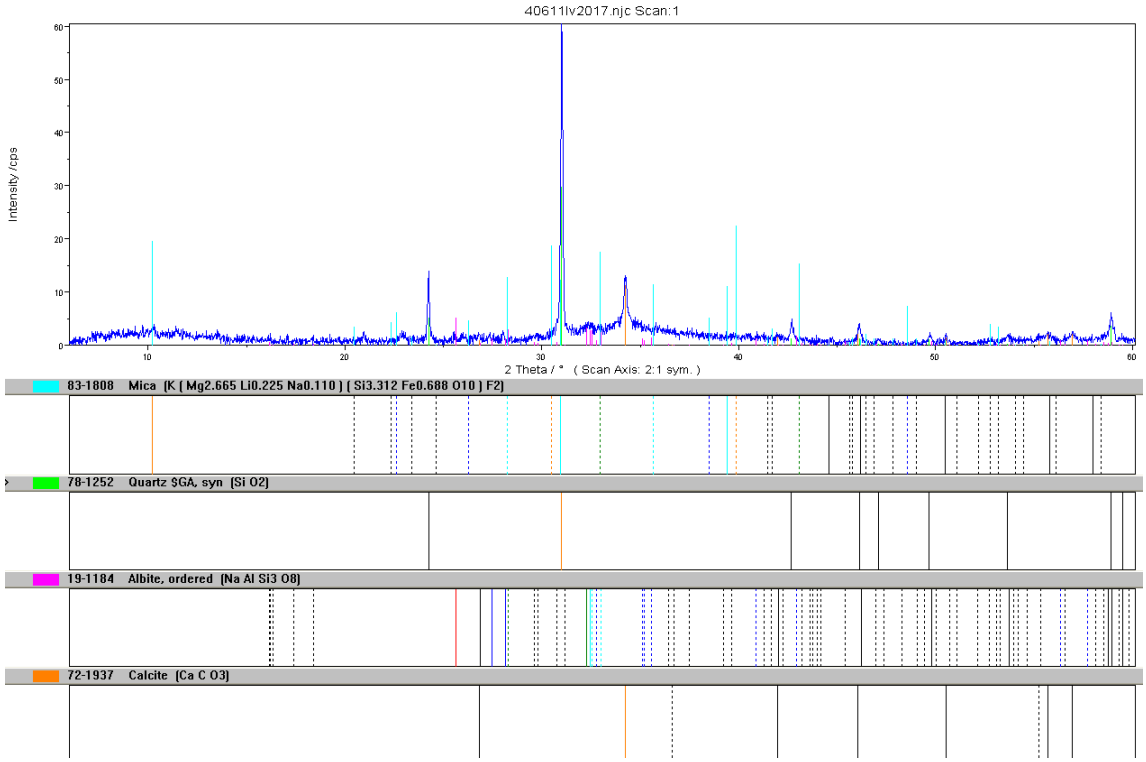
Zdroj: Vlastní šetření



Graf 10: Pevnosti vzorků v poměru kalu a metakaolinu

Zdroj: Vlastní šetření

Následně jsem u směsi vzorku metakaolinu a betonového kalu v poměru 50 % kal : 50 % metakaolin nechal změřit mineralogické složení, zda směs neobsahuje známky vzniku zeolitových struktur pro další možné využití na sorpci např. těžkých kovů.



Obr. 3: RTG vzorku metakaolinu a betonového kalu v poměru 50 % kal : 50 % metakaolin.
Zdroj: Vlastní šetření

Ze složení vzorku metakaolinu a betonového kalu v poměru 50 % kal : 50 % metakaolin je zřejmé, že jako majoritní fáze je křemen a z dalších minerálů vzorek obsahuje živec pladioklas a jako zástupce je uveden albit Na, dále slídu a karbonát vápenatý.

Pro porovnání vlastností jsem namíchal směs se stejnými příměsi ve stejném množství. Zkoumal jsem především, jaký má vliv prostředí na směs. Jelikož jsem doposud prováděl pouze směsi, které byly po vpravení do forem zabaleny v igelitu a dány do sušárny (vlhké prostředí), zajímalo mě, jak bude reagovat změna prostředí na vzorky.

Vyzkoušel jsem tedy prostředí suché, tzn., že po vyrobení vzorků, byly formy ohřáty v sušárně na 60 °C, ale nebyly formy zabaleny v igelitu.

Pracovní postup č. 2 (60 °C v suchém prostředí)

Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu sodného NaOH a přidal vodu H_2O. Obě složky jsem řádně zamíchal a tím se hydroxid sodný zcela rozpustil. Následně jsem přidal vodní sklo Na_2SiO_3 a nakonec jsem kapalnou směs nalil do nádoby, kde byla připravená suchá složka, tedy kal (K) a metakaolin (MK). Suchou složku bylo třeba řádně promíchat, neboť se tvořily hrudky. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin v sušárně při 60 °C bez igelitu, tedy v suchém prostředí.



Obr. 4: Vzorky zpevňované v suchém prostředí

Zdroj: Vlastní šetření

Vzorky se ve formách při 60 °C rozpadly, proto se s nimi už dále ve výzkumu nepokračovalo (viz fotografie).

3.2.3 Systémy se struskou

Jemně mletá vysokopecní granulovaná struska jako latentní hydraulická látka byla použita pro uvažované možné vzájemné působení i s případnými dalšími činidly tak, aby vznikla pevná struktura připravovaných směsí. Různými kombinacemi aktivačních činidel za různé hydrotermální úpravy jsem se snažil vyrobit pevnou strukturu za použití betonového kalu. Jak ze zjištěných výsledků prováděných zkoušek vyplývá, ani tato kombinace není dostatečně vhodná na to, aby se betonový kal sám podílel na vzniku pevné struktury.

3.2.3.1 Kal, vysokopecní struska a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a jemně mletá vysokopecní struska. Jednotlivé komponenty byly přidávány do směsi vždy po změně o 20 %. 100 % strusky je 16,1 g.

Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah strusky a kalu na směs s přidáním vody v konstantním množství, a jak se mění vlastnosti směsi. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a strusku v jiném poměru. Do nádoby jsem navážil suchou složku, tedy strusku a betonový kal (K) a přidával vodu dle konzistence. Směs jsem důkladně zamíchal i za pomocí vibrace, neboť se tvořily hrudky. Struska byla použita zásaditá s modulem zásaditosti MZ = $[(CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3]$ tak, že vykazovala pH 8. Poté měla být polovina vzorků ponechána v exikátoru a polovina vzorků vložena do nádoby s vodou do sušárny na 60 °C na 16 hodin.

Tabulka 14: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a strusky

Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]			Poměr kalu a strusky [%]	
	Voda	Kal	Struska	Kal	Struska
1	Dle konzistence	0,0	16,1	0	100
2		3,2	12,9	20	80
3		6,4	9,7	40	60
4		9,7	6,4	60	40
5		12,9	3,2	80	20
6		16,1	0,0	100	0

Zdroj: Vlastní šetření

U vzorků nedošlo ke zpevnění matrice, protože za přítomnosti pouze vody bylo nízké pH, které nestačilo vybudit latentně hydraulické vlastnosti jemně mleté vysokopecní granulované strusky, proto tento experiment následně zopakujeme za přítomnosti roztoku NaOH.

3.2.3.2 Kal, vysokopecní struska, hydroxid sodný a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a vysokopecní strusku. Jednotlivé komponenty byly přidávány do směsi vždy po změně o 20 %. 100 % strusky je 16,1 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah strusky a kalu na směs s přidáním vody v konstantním množství, a jak se mění vlastnosti směsi. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup:

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a strusku v jiném poměru. Do nádoby jsem navážil přesné množství suchých složek tedy strusku a betonový kal (K), vodu H_2O jsem přidával na požadovanou konzistenci a v ní byl rozpuštěný přidaný hydroxid sodný. Nakonec jsem směs důkladně zamíchal, za pomocí vibrace, neboť se tvořily hrudky. Struska byla použita zásaditá s modulem zásaditosti MZ = $[(CaO + MgO) / SiO_2 + Al_2O_3]$ tak, že vykazovala pH 8. Polovina vzorků bylo po vyjmutí z forem ponechána v exikátoru a polovina vzorků byla vložena do nádoby s vodou do sušárny na 60 °C na 16 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 16. Z tabulky č. 16 vychází graf č. 11.

Tabulka 15: Složky směsi a procentuálních poměrů kalu a strusky

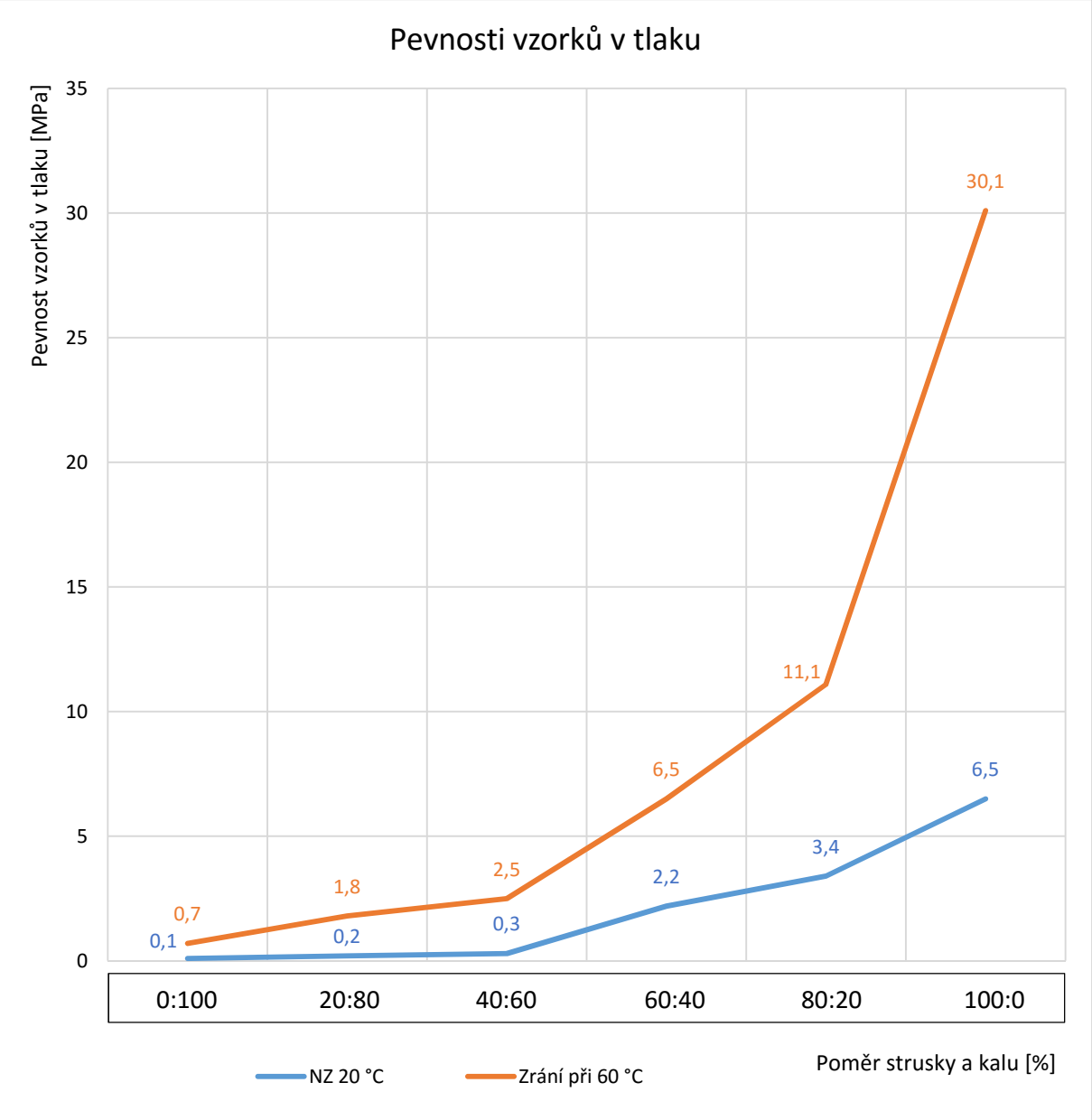
Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]				Poměr kalu a strusky [%]	
	Voda	Hydroxid sodný	Kal	Struska	Kal	Struska
1	Dle konzistence	2,3	16,1	0,0	100	0
2			12,9	3,2	80	20
3			9,7	6,4	60	40
4			6,4	9,7	40	60
5			3,2	12,9	20	80
6			0,0	16,1	0	100

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 16: Tabulka pevností jednotlivých vzorků

Pokus č.	Pevnost v tlaku vzorků v [MPa] při vlhkém uložení	
	NZ 20 °C	Zrání při 60 °C
1	0,1	0,7
2	0,2	1,8
3	0,3	2,5
4	2,2	6,5
5	3,4	11,1
6	6,5	30,1

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 11: Pevnosti vzorků v poměru strusky a kalu s NaOH

Zdroj: Vlastní šetření

Z grafu vyplývá, že čím více strusky je ve směsi, tím je větší pevnost v tlaku. Betonový kal se na pevnosti vzorků nepodílí.

3.2.3.3 Kal, vysokopecní struska, hydroxid draselný, vodní sklo a voda

Pro porovnání vlastností kompozitů byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal, hydroxid draselný, vodní sklo s jemně mletou vysokopecní granulovanou strusku, kde byla přidávána do směsi vždy v poměru s betonovým kalem po změně o 20 %. 100 % vysokopecní strusky je 16,1 g.

Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah vysokopecní strusky a betonového kalu na směs s přidáním vodního skla a hydroxidu draselného v konstantním množství, jak se mění její vlastnosti a jaká je pevnost v tlaku. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval konstantní množství hydroxidu draselného a vodního skla. Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu draselného KOH a rozpustil v části vody. K těmto složkám jsem poté přidal vodní sklo Na_2SiO_3. Nakonec se přidala suchá složka, tedy betonový kal (K) a vysokopecní struska. Struska byla použita zásaditá s modulem zásaditosti $MZ = [(CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)]$ tak, že vykazovala pH 8. Nakonec jsem směs důkladně zamíchal za vibrace, neboť se tvořily hrudky a upravil konzistenci.

Polovina vzorků byla po vyjmutí z forem ponechána v exikátoru NZ 20 °C a polovina vzorků byla vložena do nádoby s vodou a v sušárně tepelně upravena při 60 °C po dobu 16 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 18 a z tabulky č. 18 vychází graf č. 12.

Tabulka 17: Složky směsí a jejich procentuální zastoupení

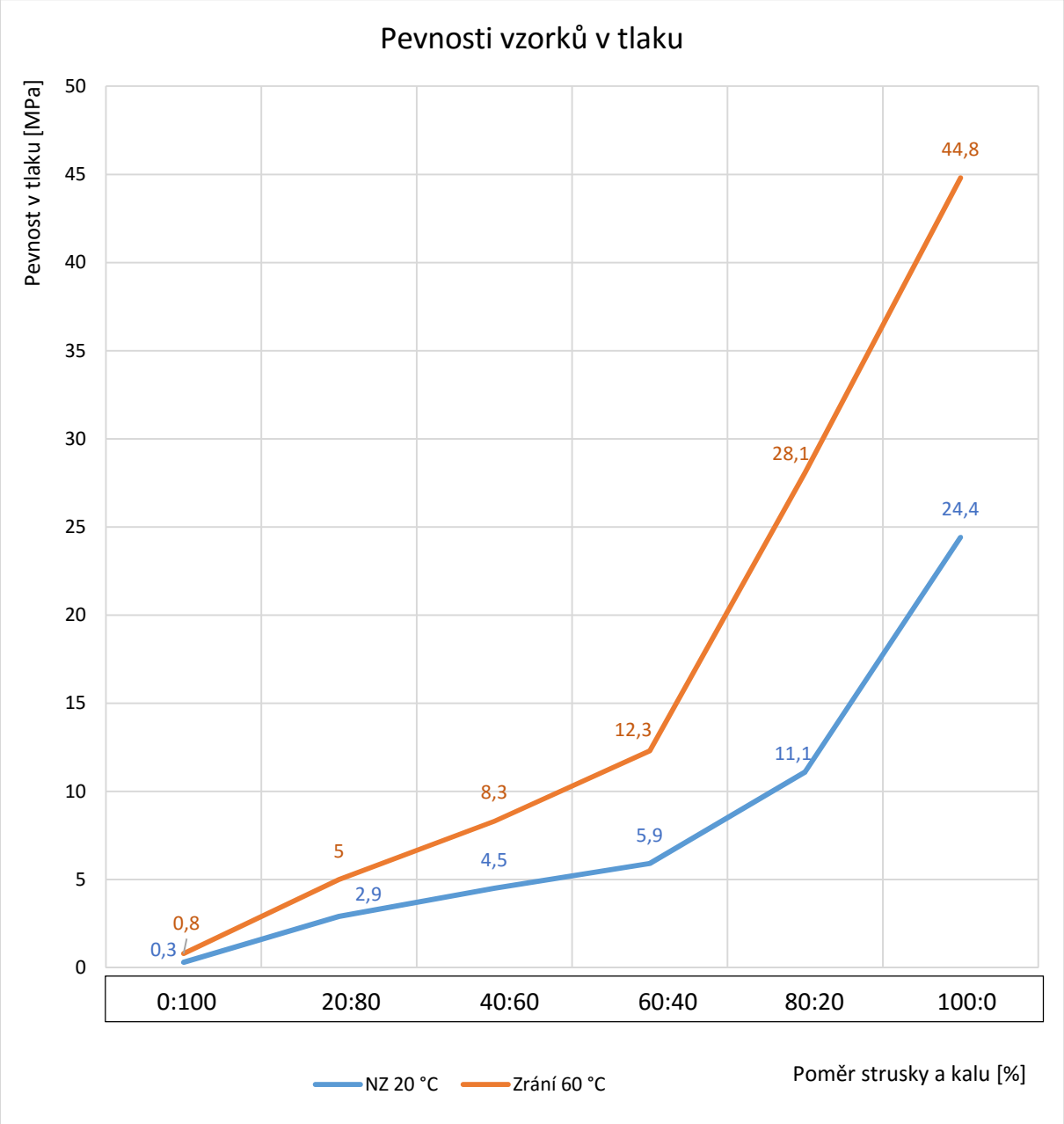
Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]					Poměr kalu a strusky [%]	
	Voda	Vodní sklo	Hydroxid draselný	Kal	Struska	Kal	Struska
1	Dle konzistence	11,5	2,3	16,1	0,0	100	0
2				12,9	3,2	80	20
3				9,7	6,4	60	40
4				6,4	9,7	40	60
5				3,2	12,9	20	80
6				0,0	16,1	0	100

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 18: Tabulka pevností jednotlivých vzorků

Pokus č.	Pevnost v tlaku směsí v [MPa] při vlhkém uložení	
	NZ 20 °C	Zrání 60 °C
1	0,3	0,8
2	2,9	5,0
3	4,5	8,3
4	5,9	12,3
5	11,1	28,1
6	24,4	44,8

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 12: Pevnosti vzorků v poměru strusky a kalu s KOH

Zdroj: Vlastní šetření

Z grafu vyplývá, že čím více strusky je ve směsi, tím větší je pevnost. Betonový kal se na pevnosti vzorků nepodílí. Pevnostem vzorků pomáhá i větší teplota, při které byly uchovávány do zatvrdnutí.

3.2.4 Aktivace kalu hydroxidem sodným

V této kapitole jsem se snažil o aktivaci betonového kalu silnou zásadou – hydroxidem sodným. Předpokládal jsem, že nezreagovaná jádra větších zrn cementu se v tomto prostředí naruší a jejich aktivací dojde k určitému nárůstu pevnosti namíchaných kompozitů. Proto bylo provedeno několik zkoušek těchto směsí z různými kombinacemi procentuálních podílů s hydroxidem sodným.

3.2.4.1 Kal, hydroxid sodný a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy kal, vodu a hydroxid sodný, který byl přidáván do směsi vždy po 20 %. 100 % hydroxidu sodného je 2,3 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah hydroxidu sodného na směs při stálém množství betonového kalu a jak se mění její vlastnosti. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech směsí byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval stejné množství betonového kalu.

Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu sodného NaOH a přidal vodu H_2O. Obě složky jsem řádně zamíchal až se hydroxid sodný zcela rozpustil. Následně jsem přidal suchou složku směsi, tedy kal (K) a řádně promíchal. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin v sušárně při 60 °C zabalený v igelitu z důvodu vlhkosti. Voda byla používána z vodovodního řádu (nezávadná).

Tabulka 19: Složky směsí a procentuální podíl hydroxidu sodného

Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek směsi [g]			Množství hydroxidu sodného [%]
	Kal	Voda	Hydroxid sodný	
1	16,1	Dle konzistence	0,0	0
2			0,5	20
3			0,9	40
4			1,4	60
5			1,8	80
6			2,3	100
7			4,6	200
8			6,9	300
9			9,2	400
10			11,5	500
11			13,8	600
12			16,1	700

Zdroj: Vlastní šetření

Poznámka č. 1: Při zkoušce této směsi bylo zřejmé, že hydroxid sodný je nedostačující k narušení mikročástic ve vzorcích. Vzniklá hmota netuhla v nádobě při výrobě vzorků, ve formách a ani v sušárně za teploty 60 °C ve vlhkém prostředí, proto na vzorcích nebyla možnost vyzkoušet pevnost v tlaku na lisu.

Poznámka č. 2: Poté, co 100 % hydroxidu sodného nestačilo, zvyšoval jsem procenta hydroxidu sodného o 100 %, nikoli o 20 %. I přes zvyšování hydroxidu o 100 % se nepodařila namíchat směs, která by ztuhla, a bylo na ní možné vyzkoušet pevnost v tlaku.

Tato směs je nevyhovující, jelikož netuhne. Je zapotřebí dodat příměs, která bude lépe reagovat na tuhnutí směsi.

3.2.5 Směsi s hydroxidem vápenatým

Hydroxid vápenatý je znám a používán jako stavební pojivo. V mém případě jsem jej tedy začlenil do zkoušených směsí a zkoumal jsem, jak se jeho přítomnost projeví na vzniku pevné struktury vzorků při ověřování tlakových pevností. Jedná se o materiál, který v dlouhodobém časovém horizontu se mění na stabilní $CaCO_3$ nebo za hydrotermálních podmínek reakcí s SiO_2 vytváří stabilní CSH gely. Z dalších jeho funkcí ve směsi z jemně zrnitými až jílovitými částicemi, vytvářející koloidní strukturu, kde jsou původní zrna obalena vždy vrstvou vodní obálky (vlhkostí) s určitým podílem sodných či draselných iontů. Portlandit, tedy $Ca(OH)_2$ je schopen tyto ionty vytěsnit a nahradit iontem vápníku Ca^{2+}, přičemž se koloidní zrna vzájemně přiblíží, spojí Ca-můstky, zmenší se jejich lyosféra a vytvoří se agregovaná struktura.

3.2.5.1 Kal, hydroxid vápenatý a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a hydroxid vápenatý, který byl přidáván do směsi vždy po 20 %. 100 % hydroxidu vápenatého je 16,1 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah hydroxidu vápenatého a kalu na směs. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a hydroxid vápenatý v jiném poměru. Do nádoby jsem navážil přesné množství suchých složek, tedy hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a betonový kal (K) a poté vodu na požadovanou konzistenci. Nakonec jsem směs důkladně zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin při laboratorní teplotě ztvrdnout.

Tabulka 20: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého

Pokus č.	Hmotnost složek ve směsi [g]			Poměr kalu a hydroxidu vápenatého [%]	
	Voda	Kal	Hydroxid vápenatý	Kal	Hydroxid vápenatý
1	Dle konzistence	0,0	16,1	0	100
2		3,2	12,9	20	80
3		6,4	9,7	40	60
4		9,7	6,4	60	40
5		12,9	3,2	80	20
6		16,1	0,0	100	0

Zdroj: Vlastní šetření

Poznámka: Jelikož byly vzorky plastické, byly vloženy do autoklávu na 190 °C.

Po vyjmutí vzorků z autoklávu se vzorky rozpadly, směs je tudíž nepoužitelná pro praxi.

3.2.5.2 Kal, vodní sklo, hydroxid vápenatý a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a hydroxid vápenatý, který byl přidáván do směsi vždy po 20 %. 100 % hydroxidu vápenatého je 16,1 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah hydroxidu vápenatého a kalu na směs. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a hydroxid vápenatý v jiném poměru. Do nádoby jsem navážil část vody H_2O a vodní sklo Na_2SiO_3. Důkladně jsem mokrou složku směsi zamíchal a přidal suchou složku, tedy hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a betonový kal (K). Nakonec jsem směs důkladně zamíchal a upravil konzistenci. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin v exikátoru ztvrdnout.

Tabulka 21: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého

Pokus č.	Hmotnost složek ve směsi [g]				Poměr kalu a hydroxidu vápenatého [%]	
	Voda	Vodní sklo	Kal	Hydroxid vápenatý	Kal	Hydroxid vápenatý
1	Dle konzistence	11,5	0,0	16,1	0	100
2			3,2	12,9	20	80
3			6,4	9,7	40	60
4			9,7	6,4	60	40
5			12,9	3,2	80	20
6			16,1	0,0	100	0

Zdroj: Vlastní šetření

Poznámka: Vzorky nedosahovaly pevnosti v tlaku větší než 1 MPa.

Pevnosti u vzorků v tlaku byly příliš nízké, směs je proto nepoužitelná v praxi.

3.2.5.3 Kal, vodní sklo, hydroxid draselný a hydroxid vápenatý a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a hydroxid vápenatý, který byl přidáván do směsi vždy po 20 %. 100 % hydroxidu vápenatého je 16,1 g.

Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah hydroxidu vápenatého a kalu na směs s přidáním hydroxidu draselného v konstantním množství a jak se mění její vlastnosti. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a hydroxid vápenatý v jiném poměru.

Do nádoby jsem navážil část vody a přidal suchou složku, tedy hydroxid draselný KOH, který jsem v ní rozpustil a přidal vodní sklo dále do této kapalné směsi jsem přimíchal hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a betonový kal (K) vždy v jiném poměru. Nakonec jsem směs důkladně zamíchal, neboť se tvořily hrudky a upravil konzistenci. Polovina vzorků byla po vyjmutí z forem ponechána v exikátoru a druhá polovina vzorků byla vložena do nádoby s vodou do sušárny na 60 °C na 16 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 23. Z tabulky č. 23 vychází graf č. 13.

Tabulka 22: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu draselného

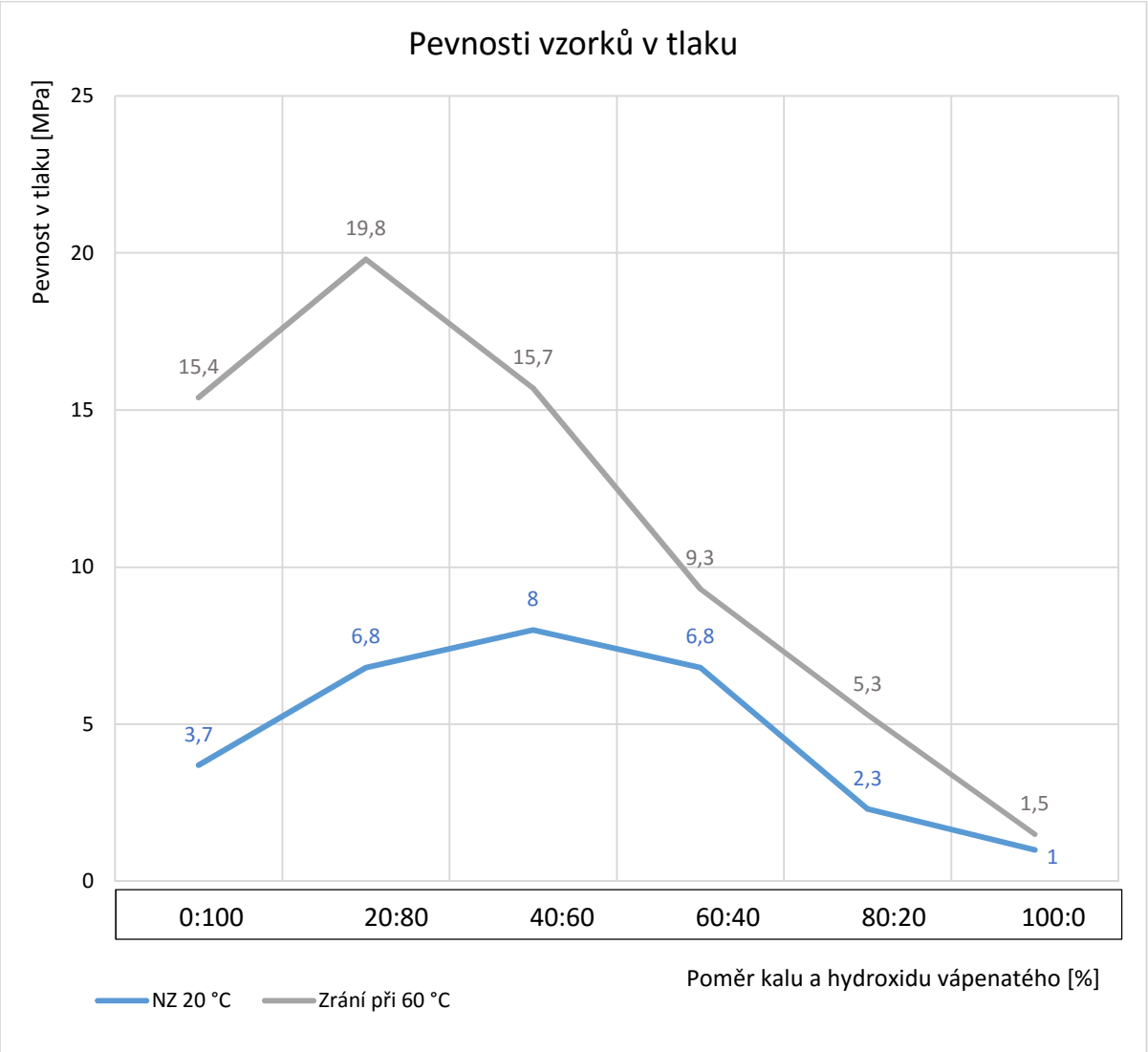
Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]					Poměr kalu a hydroxidu vápenatého [%]	
	Vodní sklo	Voda	Hydroxid draselný	Kal	Hydroxid vápenatý	Kal	Hydroxid vápenatý
1	11,5	Dle konzistence	2,3	0,0	16,1	0	100
2				3,2	12,9	20	80
3				6,4	9,7	40	60
4				9,7	6,4	60	40
5				12,9	3,2	80	20
6				16,1	0,0	100	0

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 23: Tabulka pevností jednotlivých vzorků při NZ 20 °C a 60 °C

Pokus č.	Pevnost v tlaku [MPa]	
	NZ 20 °C	Zrání při 60 °C
1	3,7	15,4
2	6,8	19,8
3	8,0	15,7
4	6,8	9,3
5	2,3	5,3
6	1,0	1,3

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 13: Pevnosti vzorků v poměru kalu a hydroxidu vápenatého

Zdroj: Vlastní šetření

Pevnosti vzorků, které byly vloženy do sušárny na 60 °C, byly výrazně vyšší, než u vzorků, které byly ponechány v exikátoru.

3.2.5.4 Kal, vodní sklo, hydroxid sodný, hydroxid vápenatý a voda

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal a hydroxid vápenatý, který byl přidáván do směsi vždy po 20 %. 100 % hydroxidu vápenatého je 16,1 g.

Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah hydroxidu vápenatého a kalu na směs. Při předešlé směsi byl nedostatek příměsi, která pozitivně reaguje na tuhnutí směsi, proto se do této směsi přidal hydroxid vápenatý.

Pracovní postup č. 1 (hydrotermální úprava při 60 °C)

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze ve použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a hydroxid vápenatý v jiném poměru.

Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu sodného NaOH a přidal vodu H_2O. Obě složky jsem řádně zamíchal a tím se hydroxid sodný zcela rozpustil. Následně jsem přidal vodní sklo Na_2SiO_3. Nakonec jsem kapalnou směs nalil do mísící nádoby s již připravenou suchou složkou, tedy betonovým kalem (K) a hydroxidem vápenatým $Ca(OH)_2$ a řádně promíchal. Suchou složku bylo nutno před smícháním s louhem stejně jako u předešlých zkoušek samostatně řádně smísit, neboť hydroxid vápenatý stejně jako metakaolin (MK) tvořil hrudky a pokud by nedošlo k důkladnému smísení suchých složek před dodáním louhu, směs by nebyla homogenní. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin v sušárně při 60 °C zabalený v igelitu z důvodu vlhkosti. Voda byla používána z vodovodního řádu (nezávadnou). Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 25. Z tabulky č. 25 vychází graf č. 14.

Tabulka 24: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého

Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]					Poměr kalu a hydroxidu vápenatého [%]	
	Vodní sklo	Hydroxid sodný	Voda	Kal	Hydroxid vápenatý	Kal	Hydroxid vápenatý
1	11,5	2,3	Dle konzistence	0,0	16,1	0	100
2				3,2	12,9	20	80
3				6,4	9,7	40	60
4				9,7	6,4	60	40
5				12,9	3,2	80	20
6				16,1	0,0	100	0

Zdroj: Vlastní šetření

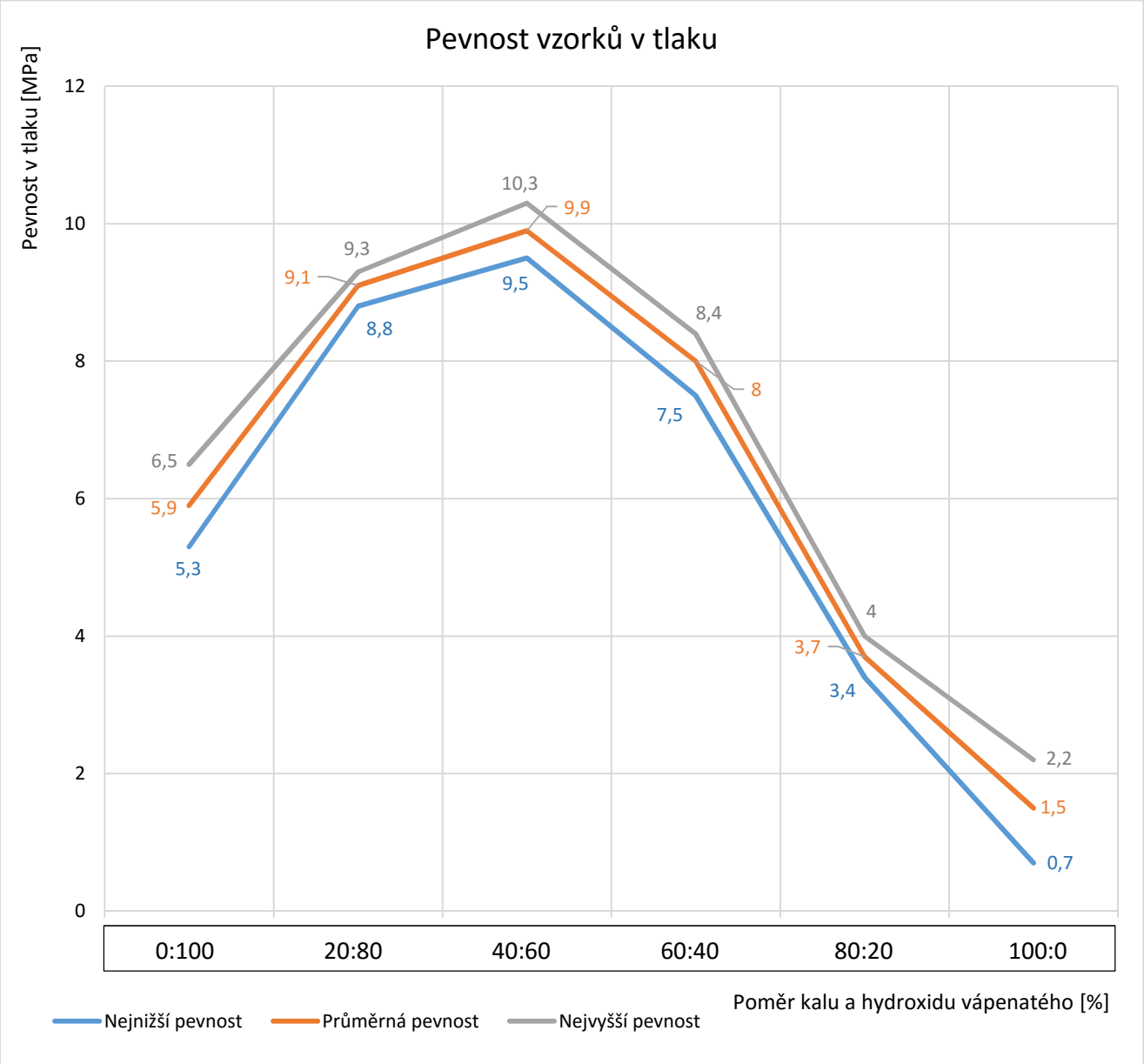
Poznámka č. 1: Čím více hydroxidu vápenatého bylo použito ve vzorcích, tím dříve dané vzorky tuhly. Jakmile se smíchala suchá a mokrá složka, musela se ihned vzniklá směs vpravit do forem. Z toho lze usoudit, že výskyt hydroxidu vápenatého je zásadní z důvodu pozitivního vlivu na tuhnutí směsi ve formách.

Poznámka č. 2: Každý pokus má 2 stejné vzorky, tudíž není nutno je psát do tabulky.

Tabulka 25: Tabulka tlakových pevností vzorků kalu a hydroxidu vápenatého

Pokus č.	Pevnost v tlaku [MPa] při hydrotermální úpravě 60 °C		
	Nejnižší	Průměrná	Nejvyšší
1	5,3	5,9	6,5
2	8,8	9,1	9,3
3	9,5	9,9	10,3
4	7,5	8,0	8,4
5	3,4	3,7	4,0
6	0,7	1,5	2,2

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 14: Pevnosti vzorků v poměru kalu a hydroxidu vápenatého při 60 °C

Zdroj: Vlastní šetření

Vzorky tuhly rychle a nedrolily se, měly ale malou pevnost v tlaku.

Pro porovnání vlastností byla namíchána směs obsahující stejné množství předešlých příměsí, jelikož minulý pokus měl velmi malé pevnosti v tlaku.

Pracovní postup č. 2 (hydrotermální úprava při NZ 20°C)

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval betonový kal a hydroxid vápenatý v jiném poměru.

Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu sodného NaOH a přidal vodu H_2O. Obě složky jsem řádně zamíchal a tím se hydroxid sodný zcela rozpustil. Následně jsem přidal vodní sklo Na_2SiO_3 a nakonec jsem kapalnou směs nalil do mísící nádoby s již připravenou suchou složkou, tedy betonovým kalem (K) a hydroxidem vápenatým $Ca(OH)_2$ a řádně promíchal. Suchou složku bylo před vpravením louhu nutno stejně jako u předešlých zkoušek samostatně řádně smísit, neboť hydroxid vápenatý stejně jako metakaolin (MK) tvořil hrudky a pokud by nedošlo k důkladnému smísení suchých složek před dodáním louhu, směs by nebyla homogenní. Vzniklou hmotu jsem vpravil do forem a nechal 16 hodin v exikátoru ztvrdnout. Voda byla používána z vodovodního řádu (nezávadná). Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku viz tabulka č. 27. Z tabulky č. 27 vychází graf č. 15.

Tabulka 26: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého

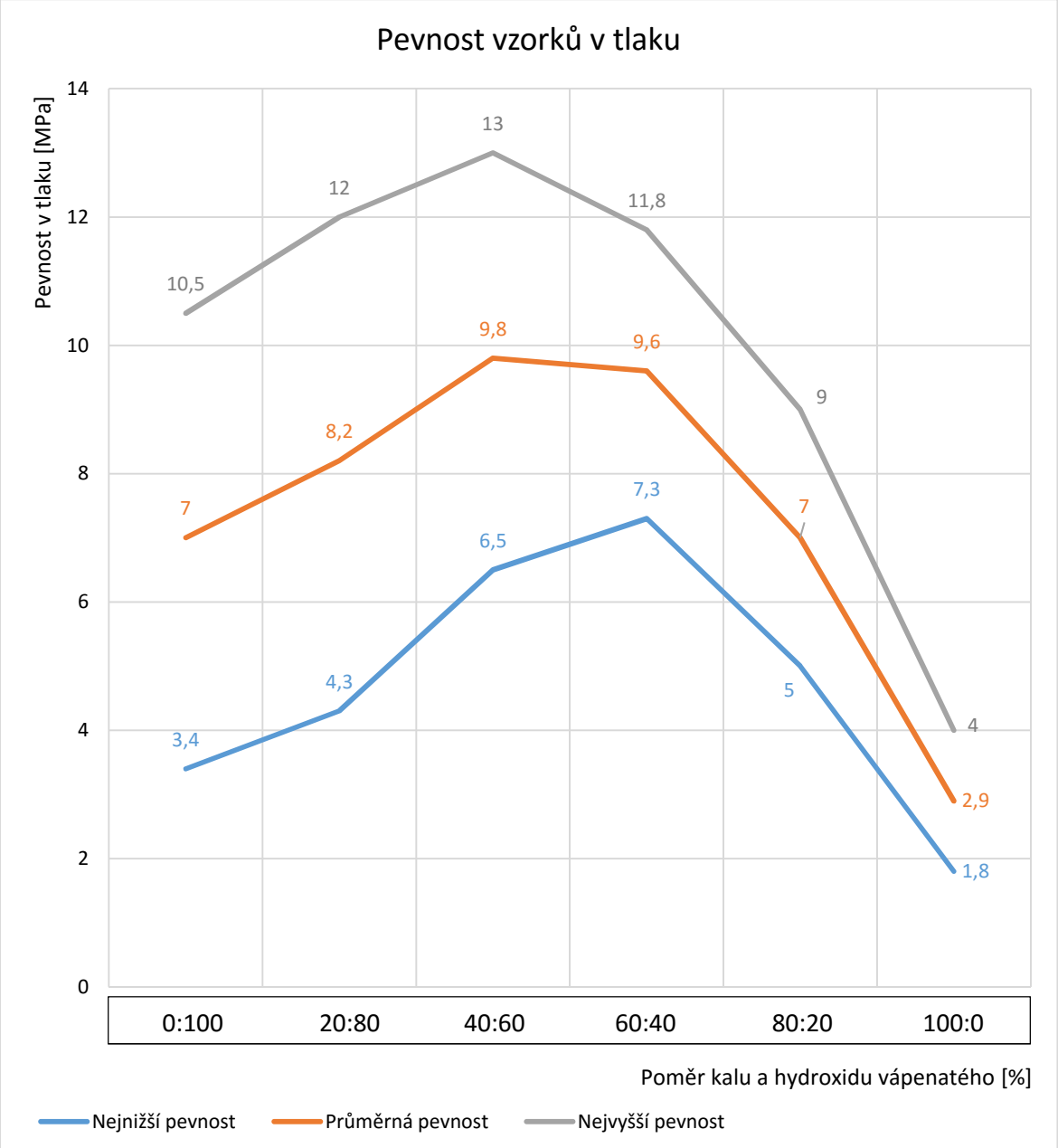
Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]					Poměr kalu a hydroxidu vápenatého [%]	
	Vodní sklo	Hydroxid sodný	Voda	Kal	Hydroxid vápenatý	Kal	Hydroxid vápenatý
1	11,5	2,3	Dle konzistence	0,0	16,1	0	100
2				3,2	12,9	20	80
3				6,4	9,7	40	60
4				9,7	6,4	60	40
5				12,9	3,2	80	20
6				16,1	0,0	100	0

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 27: Tabulka pevností vzorků při NZ 20 °C

Pokus č.	Pevnost v tlaku [MPa] při NZ 20 °C		
	Nejnižší	Průměrná	Nejvyšší
1	3,4	7,0	10,5
2	4,3	8,2	12,0
3	6,5	9,8	13,0
4	7,3	9,6	11,8
5	5,0	7,0	9,0
6	1,8	2,9	4,0

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 15: Pevnosti vzorků v poměru kalu a hydroxidu vápenatého

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.5.5 Kal, hydroxid vápenatý, síran sodný a voda

Pro porovnání vlastností a vybuzení hlinitanových minerálů byla namíchána směs obsahující suchou složku, tedy betonový kal, hydroxid vápenatý a síran sodný, který byl přidáván do směsi vždy v poměru s hydroxidem vápenatým po změně o 20 %. 100 % síranu sodného je 5 g. Zkoumal jsem především, jaký má vliv procentuální obsah hydroxidu vápenatého a síranu sodného na směs s přidáním vody v konstantním množství a jak se mění její pevnost v tlaku. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Postup při výrobě všech pokusů byl obdobný s rozdíly pouze v použitých složkách. Každý pokus obsahoval konstantní množství betonové kalu, hydroxid vápenatý a síran sodný v jiném poměru. Do nádoby jsem navážil určité množství vody H_2O a síran sodný Na_2SO_4, který se musel ihned promíchat s vodou, neboť docházelo ke krystalizaci směsi. Poté se přidala suchá složka, tedy hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a betonový kal (K). Nakonec jsem směs důkladně zamíchal za vibrace, neboť se tvořily hrudky a upravila konzistence.

Polovina vzorků byla po vyjmutí z forem ponechána v exikátoru a polovina vzorků byla vložena do nádoby s vodou a v sušárně tepelně upravena při 60 °C po dobu 16 hodin. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku.

Tabulka 28: Složky směsí a jejich procentuální zastoupení

Pokus č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]				Poměr hydroxidu vápenatého a síranu sodného [%]	
	Voda	Kal	Hydroxid vápenatý	Síran sodný	Hydroxid vápenatý	Síran sodný
1	Dle konzistence	16,1	5	0	100	0
2			4	1	80	20
3			3	2	60	40
4			2	3	40	60
5			1	4	20	80
6			0	5	0	100

Zdroj: Vlastní šetření



Obr. 5: Vzorky se síranem sodným

Zdroj: Vlastní šetření

Jelikož měly vzorky velmi malou pevnost (nepřesahující 1 MPa), směs je nepoužitelná v praxi.

3.2.6 Zkouška betonové kalu neupraveného a tepelně upraveného

V této sérii zkoušek bylo prováděno vyhodnocení chování kalu v různých směsích, kdy kal byl bez úpravy, nebo tepelně upravený, při teplotě 800 °C po dobu 16 hodin. V dále uvedených kapitolách jsou popsány směsi s vodou nebo různými aktivačními přísadami při sledování tlakových pevnostních charakteristik, které jsou pro tento výzkum jednou z důležitějších hodnot.

3.2.6.1 Zkouška tepelně neupraveného betonové kalu a voda

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost v tlaku betonového kalu, pokud kal před smísením s vodu ponecháme při laboratorní teplotě 20 °C a směs poté vložíme do různého prostředí. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Navážil jsem betonový kal (K) a vodu H_2O. Poté jsem mokrou i suchou složku smíchal a tím byla vytvořena potřebná směs. Nakonec jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Takto jsem vyrobil 3 vzorky, které byly ponechány v laboratorní teplotě. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku prováděná na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu a vody dle konzistence a všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

Tabulka 29: Směs ve složení kal a voda

Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]	
	Voda	Kal
1	Dle konzistence	16,1
2		
3		

Zdroj: Vlastní šetření

Na vzorcích nebylo možno provést zkoušky pevností v tlaku, jelikož směs neztuhla. Po odformování vzorky neudržely svůj tvar. Je zřejmé, že směs betonového kalu s vodou nestačí na to, aby byla použita v praxi.

3.2.6.2 Zkouška tepelně neupraveného betonové kalu s hydroxidem sodným a vodou

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost v tlaku betonového kalu, pokud kal před smísením s vodu a hydroxidem sodným ponecháme při laboratorní teplotě 20 °C a směs poté vložíme do různého prostředí. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Navážil jsem betonový kal (K), vodu H_2O a hydroxid sodný NaOH. Poté jsem mokrou i suchou složku smíchal a tím byla vytvořena potřebná směs. Nakonec jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Takto jsem vyrobil 3 vzorky, které byly ponechány v laboratorní teplotě. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku prováděná na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu, hydroxidu sodného a vody dle konzistence. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 31. Z tabulky č. 31 vychází graf č. 16. Dále jsou uvedeny podmínky, za kterých bylo prováděno zrání směsí.

1. vzorek byl po zatvrdnutí ponechán v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.
2. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do nádoby s vodou a uložen do sušárny při 60 °C.
3. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do autoklávu při 190 °C.

Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

Tabulka 30: Složení směsí

Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]		
	Kal	Hydroxid sodný	Voda
1	16,1	6,9	Dle konzistence
2			
3			

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 31: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	0,0
2	0,3
3	2,2

Zdroj: Vlastní šetření

Poznámka: Vzorek č. 1 byl plastický, proto měl pevnost v tlaku 0 MPa.

3.2.6.3 Zkouška tepelně neupraveného betonové kalu s hydroxidem vápenatým

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal s hydroxidem vápenatým a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost v tlaku betonového kalu, pokud kal před smísením s vodou ponecháme při laboratorní teplotě 20 °C a směs poté vložíme do různého prostředí. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup č. 1 $Ca(OH)_2$ 3,5 g

Navážil jsem betonový kal (K), hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a vodu H_2O. Hydroxid vápenatý jsem smíchal s betonovým kalem a nakonec přidal vodu. Nakonec jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Takto jsem vyrobil 3 vzorky, které byly ponechány v laboratorní teplotě 24 hodin. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku prováděná na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu, hydroxidu vápenatého vody dle kozistence. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 33. Z tabulky č. 33 vychází graf č. 16. Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

1. vzorek byl po zatvrdnutí ponechán v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.
2. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do nádoby s vodou a uložen do sušárny při 60 °C.
3. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do autoklávu při 190 °C.

Tabulka 32: Směs ve složení kal, hydroxid vápenatý a voda

Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]		
	Kal	Hydroxid vápenatý	Voda
1	16,1	3,5	Dle konzistence
2			
3			

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 33: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	0,3
2	0,9
3	3,1

Zdroj: Vlastní šetření

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal s hydroxidem vápenatým a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost v tlaku betonového kalu, pokud kal

před smísením s vodu ponecháme při laboratorní teplotě 20 °C a směs poté vložíme do různého prostředí. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup č. 2 $Ca(OH)_2$ 6,9 g

Navážil jsem betonový kal (K), hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a vodu H_2O. Hydroxid vápenatý jsem smíchal s betonovým kalem a nakonec přidal vodu. Nakonec jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Takto jsem vyrobil 3 vzorky, které byly ponechány v laboratorní teplotě. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku prováděná na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu, hydroxidu vápenatého a vody dle konzistemce. Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 35. Z tabulky č. 35 vychází graf č. 16. Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

1. vzorek byl po zatvrdnutí ponechán v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.
2. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do nádoby s vodou a uložen do sušárny při 60 °C.
3. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do autoklávu při 190 °C.

Tabulka 34: Směs ve složení kal hydroxid vápenatý a voda

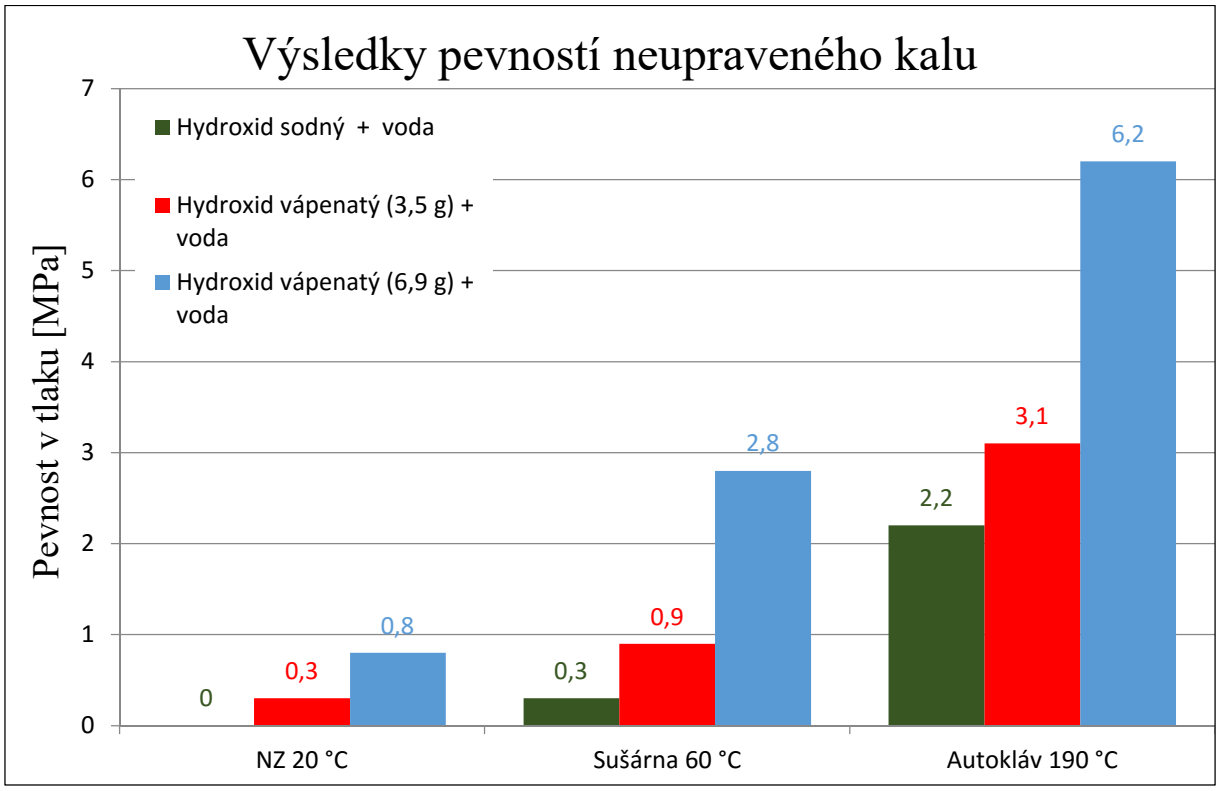
Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]		
	Kal	Hydroxid vápenatý	Voda
1	16,1	6,9	Dle konzistence
2			
3			

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 35: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	0,8
2	2,8
3	6,2

Zdroj: Vlastní šetření

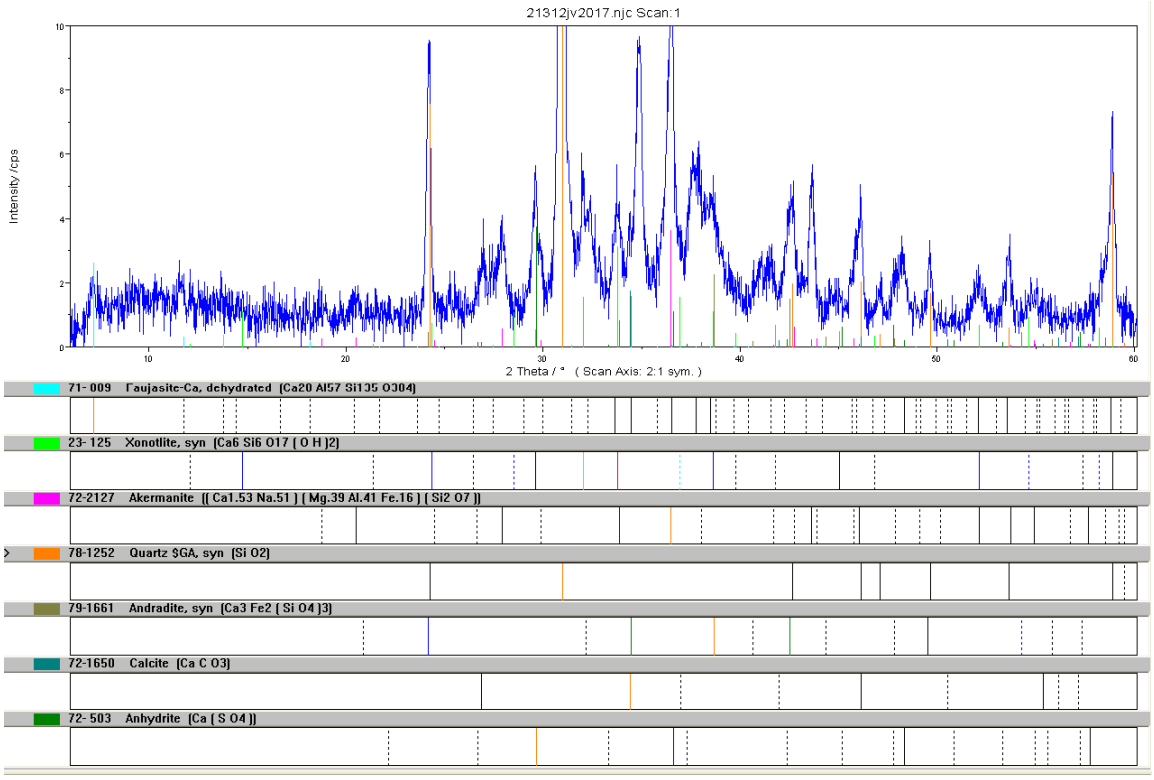


Graf 16: Pevnosti vzorků ve směsích s neupraveným betonovým kalem

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.6.4 Zkouška tepelně upraveného betonového kalu a voda

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost v tlaku betonového kalu, pokud kal před smísením s vodu vypálíme v peci na 800 °C po dobu 16 hodin a směs poté vložíme do různého prostředí. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou). Po tepelné úpravě kalu jsem si nechal provést rentgenostrukturální rozbor, abych měl přehled o struktuře materiálu a možných chemických reakcích směřujících k získání co nejvyšší pevnosti vzorku v tlaku.



Obr. 6: RTG tepelně upraveného betonového kalu

Zdroj: Vlastní šetření

Složení vzorku tepelně upraveného betonového kalu je následující: vyskytují se zde krystalické fáze z cementu, jakož je anhydrid, což je dehydratovaný sádrovec – regulátor tuhnutí a akermanit vysokoteplotní krystalická fáze jako zbytek ze strusky a cementu. Dále jsou zde jemné částice kameniva (0–0,25 mm), což jsou andradit, křemen a kalcit, který může být jednak z kameniva anebo je produktem karbonatace portlanditu vznikajícího při hydrataci cementu. Na tomto snímku je dále vidět velké haló po celé délce rentgenogramu, které odráží velký podíl gelových fází dlouho vláknitých CSH I, z nichž se některé teplotní úpravou převedly na stabilní vysokoteplotní semikrystalický xonotlit. Pozoruhodný je také výskyt zeolitu fujasitu i přesto, že je v minoritním množství.

Pracovní postup

Navážil jsem betonový kal (K) a vodu H_2O. Poté jsem mokrou i suchou složku smíchal a tím byla vytvořena potřebná směs. Nakonec jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Takto jsem vyrobil 3 vzorky, které byly ponechány v laboratorní teplotě. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku byla prováděna na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu a vody dle konzistence.

Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 37. Z tabulky č. 37 vychází graf č. 17. Dále jsou uvedeny podmínky, za kterých bylo prováděno zrání směsí.

1. vzorek byl po zatvrdnutí ponechán v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.

2. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do nádoby s vodou a uložen do sušárny při 60 °C.

3. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do autoklávu při 190 °C.

Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

Tabulka 36: Směs ve složení upravený kal a voda

Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]	
	Kal	Voda
1	16,1	Dle konzistence
2		
3		

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 37: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	1,2
2	3,1
3	9,9

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.6.5 Zkouška tepelně upraveného betonové kalu s hydroxidem sodným

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal s hydroxidem sodným a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost v tlaku vzorků z betonového kalu, pokud kal před smísením s vodu tepelně upravíme při 800 °C po dobu 16 hodin. Směs poté vložíme do různého prostředí (exikátor, sušárna a autokláv). Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Navážil jsem betonový kal (K), hydroxid sodný NaOH a vodu H_2O. Hydroxid sodný jsem smíchal s vodou a nakonec přidal betonový kal. Nakonec jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku prováděná na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu, hydroxidu vápenatého a vody dle konzistence.

Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku viz tabulka č. 39. Z tabulky č. 39 vychází graf č. 17. Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

1. vzorek byl po zatvrdnutí ponechán v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.
2. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do nádoby s vodou a uložen do sušárny při 60 °C.
3. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do autoklávu při 190 °C.

Tabulka 38: Směs ve složení kal, hydroxid sodný a voda

Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]		
	Kal	Hydroxid sodný	Voda
1	16,1	6,9	Dle konzistence
2			
3			

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 39: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	0,6
2	0,9
3	1,5

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.6.6 Zkouška tepelně upraveného betonové kalu s hydroxidem vápenatým

Do této zkoušky byla připravena směs obsahující betonový kal s hydroxidem vápenatým a záměsovou vodu. Chtěl jsem zjistit, jak se změní pevnost vzorků v tlaku betonového kalu, hydroxidu vápenatého a vody. Kal byl použit tepelně upravený při 800 °C po dobu 16 hodin v peci. Namíchanou směs poté vložíme do různého prostředí. Používal jsem vodu z vodovodního řádu (nezávadnou).

Pracovní postup

Navážil jsem betonový kal (K), hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$ a vodu H_2O. Hydroxid vápenatý jsem smíchal s betonovým kalem a nakonec přidal vodu. Dále jsem směs důkladně vibrací zamíchal, neboť se tvořily hrudky. Takto jsem vyrobil 3 vzorky, které byly ponechány v laboratorní teplotě po dobu 24 hodin. Po odformování jsem každý vzorek umístil do jiného prostředí za jiné teploty a zkoumal, jak se změní vlastnosti zatuhlé směsi – zkouška pevnosti v tlaku prováděná na lisu. Každý vzorek obsahoval směs pouze z konstantního množství kalu, hydroxidu vápenatého a vody dle konzistence.

Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 41. Z tabulky č. 41 vychází graf č. 17. Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

1. vzorek byl po zatvrdnutí ponechán v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.
2. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do nádoby s vodou a uložen do sušárny při 60 °C.
3. vzorek byl po zatvrdnutí vložen do autoklávu při 190 °C.

Tabulka 40: Směs ve složení kal, hydroxid vápenatý a voda

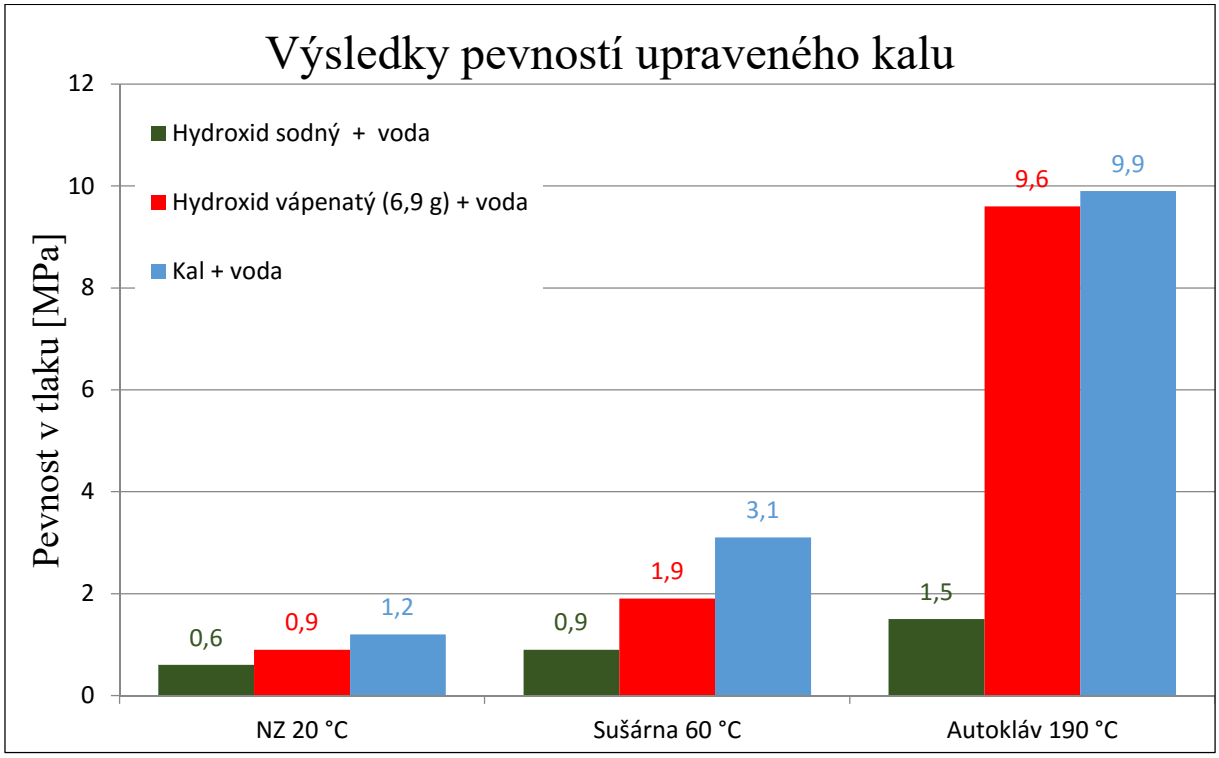
Vzorek č.	Hmotnost jednotlivých složek ve směsi [g]		
	Kal	Hydroxid vápenatý	Voda
1	16,1	6,9	Dle konzistence
2			
3			

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 41: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Pevnost v tlaku [MPa]
1	0,9
2	1,9
3	9,6

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 17: Pevnosti vzorků ve směsích s upraveným betonovým kalem

Zdroj: Vlastní šetření

3.2.6.7 Zkouška a tepelně upravený kal ve směsi s hydroxidem Na a K při 550 °C

Pro porovnání vlastností jsem provedl zkoušky pevností v tlaku na směsích obsahujících kal, hydroxid sodný, draselný a vodu, přičemž kal a oba hydroxidy byly současně tepelně upraveny v peci za teploty 550 °C. Vzorky byly vyrobeny ze 100 g suché složky, tedy kalu, hydroxidu sodného a draselného, kterého bylo ve směsi 62 g. Směs také obsahovala vodu dle konzistence.

Zkoumal jsem především, jaký má vliv obsah kalu a hydroxidů, jestliže jsou tyto suché složky současně tepelně upravovány v peci.

Pracovní postup:

Do nádoby jsem navážil přesné množství hydroxidu sodného, draselného a kalu. Suché složky jsem smísil a dal do pece, ve které se teplota zvyšovala s výdrží na 550 °C po dobu 16 hodin. Poté jsem vyžíhanou směs vyjmul a nechal vychladnout na laboratorní teplotu

20 °C. Nakonec jsem tuto směs smíchal s vodou a výslednou plastickou hmotu vpravil do forem.

Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 43. Z tabulky č. 43 vychází graf č. 18. Všechny vzorky byly uloženy v různých prostředích po dobu 16 hodin.

Dále jsou uvedeny podmínky, za kterých bylo prováděno zrání směsí:

1. 2 vzorky byly po zatvrdnutí ponechány v exikátoru při laboratorní teplotě 20 °C.
2. 2 vzorky byly po zatvrdnutí vloženy do nádoby s vodou a uloženy do sušárny při 60 °C.
3. 2 vzorky byly po zatvrdnutí vloženy do autoklávu a ohřívány na 190 °C.

Tabulka 42: Směs ve složení kal s hydroxidem sodným, draselným a voda

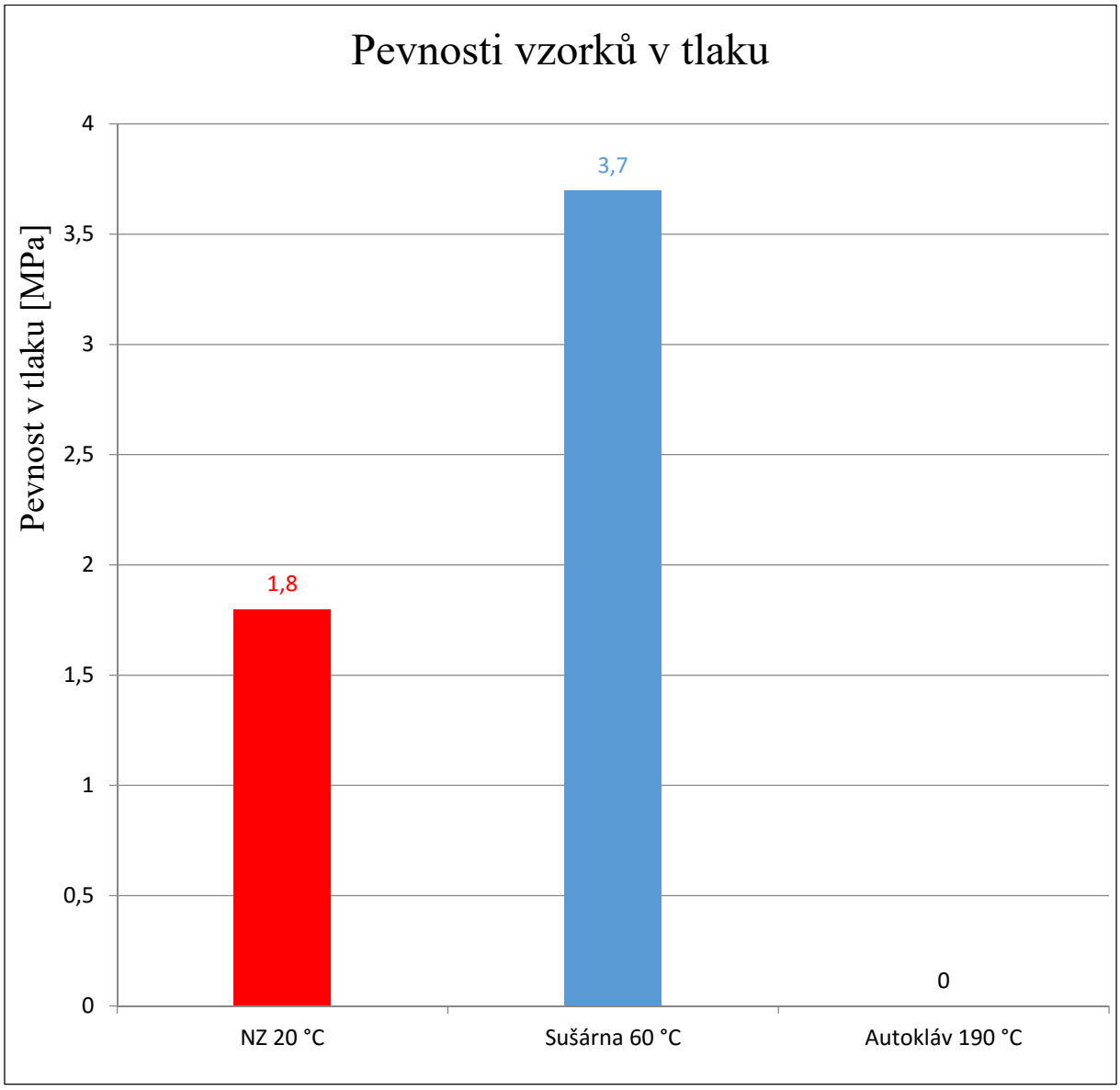
Pokus	Hmotnost jednotlivých složek směsi [g]		
	Kal	Hydroxid Na a K	Voda
1	100	31 + 31	Dle konzistence
2			
3			

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 43: Pevnosti v tlaku při různé teplotě zrání

Vzorek č.	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
1	1,8
2	3,7
3	Vzorky se rozpadly v peci.

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 18: Pevnosti vzorků v tlaku betonového kalu žíhaného s hydroxidem sodným a draselným

Zdroj: Vlastní šetření

Z uvedeného grafu je zřejmé, že s teplotou 20 °C a 60 °C se zvyšuje pevnost a při hydrotermální úpravě na teplotu 190 °C došlo k rozpadu zkušebních tělísek.

3.2.7 Zkouška směsi kalu a cihlářské hlíny

Pro porovnání ověření vlastností jsem provedl zkoušky pevností v tlaku na směsích obsahujících cihlářskou hlínu (jíl) a kal v poměrech uvedených v tabulce č. 44. Zkoumal jsem především, jaký má vliv obsah kalu a cihlářské hlíny, jestliže jsou tyto suché složky společně tepelně upravovány v peci.

Poté byla na vzorcích prováděna zkouška pevnosti v tlaku, viz tabulka č. 44. Z tabulky č. 44 vychází graf č. 19. Všechny vzorky byly uloženy v různých teplotách po dobu 3 hodin.

Dále jsou uvedeny podmínky, za kterých byl prováděn výpal vzorků:

1. Vzorky byly po vyschnutí vloženy do pece a zahřívány na 900 °C.

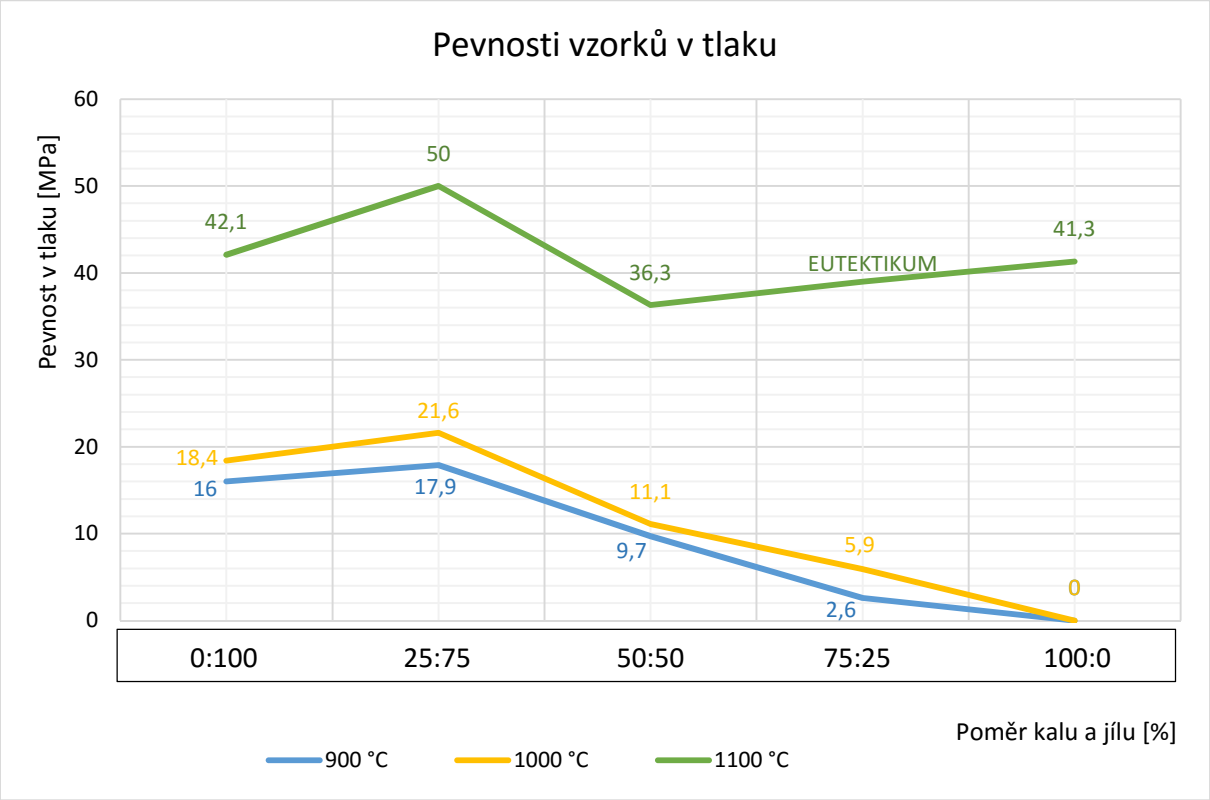
2. Vzorky byly po vyschnutí vloženy do pece a zahřívány na 1 000 °C.

3. Vzorky byly po vyschnutí vloženy do pece a zahřívány na 1 100 °C.

Tabulka 44: Složení vzorků a pevnosti v tlaku při různé teplotě výpalu

Složení vzorků v hm.%		Pevnost v tlaku v MPa při teplotě výpalu ve °C		
Kal	Jíl	900	1 000	1 100
0	100	16,0	18,4	42,1
25	75	17,9	21,6	50,0
50	50	9,7	11,1	36,3
75	25	2,6	5,9	EUTEKTIKUM
100	0	0,0	0,0	41,3

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 19: Pevnosti vzorků po výpalu směs jíl a betonový kal

Zdroj: Vlastní šetření



Obr. 7: Vzorky výpalu jíl s kalem

Zdroj: Vlastní šetření

4 Vyhodnocení a možnosti využití kalu

Zkoušená hmota – betonový kal je možné využít k rozmanitým způsobům ve stavební praxi, a to buď bez dalších úprav jako příměs do různých výrobních nebo pojivových směsí. Za určitých podmínek zpracování betonového kalu, jak je uvedeno v této práci, lze také připravit různé aktivní pojivové směsi s dosažením dostatečných tlakových pevnostních charakteristik vzorků a současně s možností sorpce např. iontů těžkých kovů v záměsové vodě při přípravě solidifikačních směsí apod.

4.1 Využití neupraveného kalu jako plniva

Použití neupraveného betonového kalu při přípravě stavebních pojiv event. jeho příměs do stavebních hmot je závislá na jeho fyzikální a chemické podstatě jako původního materiálu a toto jej začlenění do vazebných systémů v připravovaných hmotách, pojivech či směsích.

4.1.1 Betonový kal jako surovina při výrobě portlandského slinku

Samotná podstata betonového kalu, se dá zařadit do jemných podílů tuhých částic. Je to ve své podstatě disperzní soustava, kde dispersním prostředím je kapalina v našem případě voda a dispergovaná látka je betonový kal, tedy prášková látka s velikostí zrn od 0,5 do 50 μm, kap. 3.1.1.2. Uvedená zrna se mohou podílet i na tvorbě portlandského slinku. Že je tato alternativa použitelná vychází z provedeného chemického rozboru složení betonového kalu, jehož výsledek je uveden v tabulce č. 45. Ze zjištěných hodnot jasně vyplývá, že jeho složení ve značné míře koresponduje s chemickým složením slínku. Jedině obsah CaO a SiO_2 nejsou v potřebných poměrech, ale vzhledem k případnému použití by obsah kalu k celkovému objemu základní suroviny pro výrobu slinku představoval minoritní položku a tedy rozptyl hodnot u surovinové moučky by pokryl tento nesoulad.

Tabulka 45: Porovnání chemického složení kalu a PC slinku

Chemické složení kalu a slinku v [%]									
Obsah oxidů	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	MgO	SO_3	Na_2O+K_2O	TiO_2
Kal	31,6	47,1	10,4	3,7	0,1	1,9	2,1	1,8	0,4
Slinek	61–68	20–24	4–8	2–4	0,1–0,3	0,5–6	0,2–1	0,8–1,5	0,1–0,5

Zdroj: Vlastní šetření

4.1.2 Betonový kal jako příměs do směsných cementů

Do směsných cementů se přidává celá řada složek ať aktivních či neaktivních. Jednou z možností používané příměsi je i mnou zkoumaný betonový kal, který při tomto zpracování je možné do určité míry využívat i při zachování pevnostních charakteristik betonových

konstrukcí či výrobků. Jeho podíl závisí na druhu a třídě cementu, kameniva a způsobu zpracování.

4.1.3 Příměs betonového kalu při absenci jemných podílů v kamenivu

Při absenci jemných podílů, do kterých se zařazuje i betonový kal je vhodné jej využít na doplnění křivky zrnitosti v mezích normy a zvýšení tak pevnosti jak je uvedeno v kapitole 3.2.1.1. a 3.2.1.3 V této souvislosti bych chtěl ještě zdůraznit, že přídavek kalu řeší z technologického hlediska hutnost a nepropustnost struktury betonu a zlepšuje jeho zpracovatelnost vzhledem k zaoblenému tvaru částic jak je uvedeno kapitole 3.1.1.5. Toto využití by bylo pro výrobnu Řepov u Mladé Boleslavi velmi zajímavé, a proto aplikace uvedená v této kapitole je velmi zajímavým řešením.

4.1.4 Využití betonového kalu jako glazury

Využití betonového kalu ve formě vodní disperze, jako směsi pro glazování, vyplývá ze složení, ve kterém je vidět velký podíl taviv. Složení je znázorněno v diagramu na obrázku č. 1: „RTG betonového kalu“, kde jsou jasně patrny fáze ve formě živců a vápenců, což koresponduje s tabulkou č. 1 chemického rozboru betonového kalu. Odzkoušený betonový kal se tavil při teplotě 1 150 °C, a jeho barva a struktura je patrná na uvedeném obrázku. Předpokládal jsem, že tuto glazuru by bylo možno využít zejména u technických výrobků pro zlepšení jejich charakteristik např. snížení nasákavosti, omyvatelný povrch a nevyžadují zvláštní estetickou úroveň.



Obr. 8: Fotografie glazury vyrobené z betonového kalu

Zdroj: Vlastní šetření

4.1.5 Využití betonového kalu pro 3D tisk

Vlastnosti betonového kalu, tak jak jsou uvedeny v této práci, je možné jej využít i pro sofistikovanější zpracování několika různými způsoby.

Výrobky pro stavebnictví ve formě 3D tisku za mokra ze směsi uvedené v této práci v kapitole 3.2.5.3, protože jak ze zjištěných výsledků tlakových pevností vyplývá, jsou

pevnosti cihel nebo cihelného zdiva na stejných hodnotách tlakových pevností, tzn. pohybují se již od 6 MPa. Rychlost tuhnutí těchto směsí za použití hydroxidu vápenatého a vodního skla se dá dle použitých koncentrací namíchat tak, že jejich počátek tuhnutí začíná během několika minut či hodin.

Vzhledem k chemickému a mineralogickému složení betonového kalu by bylo možné na laserové 3D tiskárně tuto hmotu spékat, protože obsahuje velké množství minerálů s alkalickými kovy a kovy alkalických zemin, které se ve stavební praxi používají jako taviva, a tím by bylo spojování zrn velice snadné.

4.1.6 Příměs kalu při výrobě keramiky

Obecně výroba keramických výrobků probíhá především z jílových zemin, které mají obdobnou zrnitost a v některých druzích těchto výrobků jsou vyráběny s příměsí taviv, které napomáhají zvýšení hutnosti, tím snížení pórovitosti a zvýšení pevnosti zejména tlakové. Při mých zkouškách jsem se i touto problematikou zabýval, a tak po odzkoušení několika kombinací jílu a kalem jsem zjistil, že i tato alternativa je možná a funkční. Vzhledem k množství odpadního betonového kalu lze veškerý tento kal bez problémů zpracovat při výrobě keramických výrobků v závodě Řepov a ušetřit tak veškeré náklady na jeho likvidaci. Z přiložených zkoušek uvedených v kapitole 3.2.7 jasně vyplývá, že přísada do cihlářských výrobků v množství 25 % kalu pozitivně ovlivňuje pevnost cihlářského střepu což určuje jeden ze směrů možnosti využití zkoumaného materiálu.

4.1.7 Příměs kalu při výrobě plynobetonu nebo plynosilikátu

Použití kalu jako plniva do plynobetonů nebo plynosilikátů s event. možností využití obsahu vápna a SiO_2 jako pojivových složek je nutno řešit specificky vzhledem k jeho složení, které není vždy stejné. I přesto jsem několik vzorků vyrobil.

4.2 Využití betonového kalu do pojivových systémů

Zkoušky tepelně neupraveného a upraveného kalu jasně vykazují relativně nízké pevnosti v tlaku. Tato charakteristika kalu se prolínala všemi zkoumanými kompozity, jak je uvedeno v tabulce 46. Z uvedených zkoušek jasně vyplynulo, že nemá příliš mnoho aktivních látek a je nutno při jeho použití vždy do směsi přidávat aktivační složky nejlépe silně zásadité povahy a současně je výhodné hydrotermální zpracování, které aktivuje zejména přítomnou strusku používanou jako aktivní příměs směsných cementů a event. i větší zrna cementu, která nebyla dostatečně zhydratována. Vzniklé pevnosti by bylo možné též využívat zejména při přípravě

solidifikačních směsí pro zpevňování např. základových půd nebo pro stabilizaci vytěžených důlních prostor event. s přídavkem toxických materiálů určených k likvidaci apod.

4.3Ekonomické vyhodnocení likvidace kalu (z roku 2016)

Betonový kal se v dnešní době zpětně využívá velmi zřídka nebo nevyužívá vůbec. Končí na skládce, což je finančně náročné a zbytečné, jelikož má kal specifické vlastnosti a může být použit do betonu jako složka vyplňující mezery mezi kamenivem. V následujících řádcích poskytnu informace a důkazy pro to, že zpětným využíváním kalu se ušetří náklady na cement, které jsou velké. Cement jako základní a nejpoužívanější pojivo do betonu je finančně náročné.

Celkem 1) odpadu: 379,3 t (po odstředění 206,9 t = sušina)

2) cesta na skládku: 4160 km

3) kontejnerů: 80

Kal mokrý – 42 % sušiny, 58 % voda

Kal suchý – 77 % sušiny, 23 % voda

Náklady na odstředění kalu 1 754 241 Kč

Náklady na likvidaci betonového **mokrého** kalu:

1) skládka: 379,3 t × 435 Kč = 164 996 Kč

2) doprava: 4 160 km × 28 Kč = 116 480 Kč

3) manipulace: 80 ks × 120 Kč = 9 600 Kč

Celkem 291 076 Kč

Náklady na likvidaci betonového **odstředěného** (suchého) kalu:

1) skládka: 206,9 t × 212 Kč = 43 863 Kč

2) doprava: 1 056 km × 29 Kč = 30 624 Kč

3) manipulace: 44 ks × 120 Kč = 5 280 Kč

Celkem 79 767 Kč

Odstředěním kalu je úspora minimálně 211 309 Kč.

Celkové náklady na likvidaci suchého kalu 1 622 699 Kč.

Tabulka 46: Tlakové pevnostní charakteristiky vybraných kompozitů

Výsledky pevnostních charakteristik kompozitů s betonovým kalem za různých podmínek											
Kapitola	Bet. kal		Cement	Kamenivo	Vodní sklo	NaOH	$Ca(OH)_2$	KOH	Voda	Tepelná úprava	Pevnost v tlaku MPa
3.2.1.1	4,7		14,4	19,8	---	---	---	---	Dle konzistence	NZ 20 °C	18,6
	4,7		28,8	19,8	---	---	---	---		NZ 20 °C	25,9
3.2.1.3	2,0		28,8	37,9						NZ 20 °C	26,3
3.2.4.2 /1	6,4		---	---	11,5	2,3	9,7	---		60 °C	9,9
3.2.4.2 /2	6,4		---	---	11,5	2,3	9,7	---		NZ 20 °C	9,8
3.2.5.3 /1	3,2		---	---	11,5	---	12,9	2,3		60 °C	19,8
3.2.5.3 /2	6,4		---	---	11,5	---	9,7	2,3		NZ 20 °C	8,0
3.2.6.2	16,1	Neupravený				6,9				Autokláv 190 °C	2,2
3.2.6.3 /1	16,1						3,5			Autokláv 190 °C	3,1
3.2.6.3 /2	16,1						6,9			60 °C	2,8
	16,1						6,9			Autokláv 190 °C	6,2
3.2.6.4	16,1	Upravený								Autokláv 190 °C	9,9
	16,1									60 °C	3,1
3.2.6.6	16,1						6,9			Autokláv 190 °C	9,6

Poznámka: Navážky surovin jsou uvedeny v gramech

Závěr

Předložená práce se zabývá vlastnostmi a využitím betonového kalu buď jako příměsí do různých stavebních materiálů, nebo pro výrobu materiálových kompozitů s využitím jako pojivo zrnitých materiálů ve stavebních konstrukcích. Hlavní část této práce spočívá ve studiu vlivu hydrotermálních podmínek a materiálového složení na změnu mineralogického složení připravovaných kompozitů v návaznosti na jejich pevnosti v tlaku.

Budoucnost vývoje a to i ve stavebnictví směřuje k využívání druhotných surovin ze stavebních procesů k dalšímu zpracování a ne k likvidaci, což bývá většinou velmi nákladné. Cílem není jen výroba různých pojivových systémů, ale eventuální využití i jako příměs při výrobě různých stavebních hmot, a tím úspora tradičně používaných komponentů. Zde je jedním z nezbytných požadavků růst dlouhodobé stálosti nových kompozitů, převážně ve stavebním průmyslu. Abychom mohli modelovat jednotlivé chemické kombinace různých druhů výrobních surovin, musíme nejdříve poznat jejich charakteristiky chování za rozdílných technologických podmínek zpracování. Proto hlavním požadavkem pro lepší pochopení vlastností materiálů z nich vyrobených je studium složení mikrostruktury s rozlišením druhové použitelnosti a současně s dodržením dlouhodobé stálosti.

Využití pojiv v budoucnosti bude vycházet nejenom z místních zdrojů, ale i z druhotných surovin a odpadních materiálů. Pojiva, kompozitní malty a betony budou vyráběny na míru tak, aby splňovaly specifické požadavky na jejich použití pro daný účel. Lepší znalosti vlastností materiálů a procesů jejich přípravy spojené zejména z jejich hydratačními reakcemi vedou k úspěšnému kombinování materiálů různého původu a složení.

Kompozitní směsi, v nichž se používají druhotné suroviny, mají široké aplikace v různých oblastech průmyslu, ale také přispívají k zlepšování životního prostředí, a to zejména při aplikacích jako solidifikační materiály různých toxických odpadů nebo kontaminovaných půd, což se očekává od jejich struktury, se schopností imobilizovat potenciálně toxické elementy. Princip alkalické a hydrotermální aktivace směsí je určitou alternativou využití latentní aktivity nezreagovaných zrn cementu a eventuálně zrn strusky u strusko-portlandských cementů. Vhodným využitím může být betonový kal i jako přísada do cementů nebo betonů při absenci jemných podílů kameniva, čímž betony docilují přijatelného synergického efektu, který poskytuje lepší vlastnosti, a to zejména nepropustnost pro vodu a

pevnost v tlaku. Tento filér prezentuje zejména svými jemnými aktivními částicemi v betonu interakce za působení portlanditu vznikajícího při hydrataci slínkových minerálů.

V této práci bylo nastíněno několik směrů možnosti využití druhotné suroviny „betonového kalu“, který řeší ekologické i ekonomické problémy současně a přispívá tak ke zlepšení životního prostředí, jehož kvalita je dnes v řadě odvětví velkým problémem.

Seznam literatury

[1] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.

[2] KOHOUTKOVÁ, Alena. *Betonové konstrukce 1*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03197-7.

[3] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.

[4] MALÝ, Josef a Pavla ROVNANÍKOVÁ. *Základy chemie: učební text pro studenty distančního a denního studia*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0611-9.

[5] MALÝ, Josef. *Stavební chemie: Laboratorní cvičení : [Určeno pro posl. fak. staveb. VUT v Brně]*. Brno: CERM, 1994. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-85867-34-6.

[6] ROVNANÍKOVÁ, Pavla a Josef MALÝ. *Stavební chemie: Přednášky : [Určeno pro posl. fak. staveb. VUT v Brně]*. Brno: CERM, 1994. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-85867-39-7.

[7] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-347-9.

[8] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.

[9] *Encyklopedický přehled minerálů*. Praha: Academia, 1992. ISBN 80-200-0360-6.

[10] Henning, Otto; Lach, Vladimír chemie ve stavebnictví 1983, 1. vydání, Vydavatel: SNTL, Místo vydání: Praha

[11] BLAŽEK, Jaroslav a Ján FABINI. *Chemie pro studijní obory SOŠ a SOU nechemického zaměření*. Praha: SPN - pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 8072351044.

[12] Prof. Ing. Dr. Alois Wagner, vydavatel: Vysoké učení technické v Brně, Vyšlo: 1968, nakladatel: SNTL, Základy chemie

[13] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I*. Brno: PC-DIR, 1993. ISBN 80-214-0509-0.

[14] Doc. Ing. Jan Hlaváč, DrSc., Základy technologie silikátů, Praha 1981, nakladatelství technické literatury.

[15] Ing. Jindřich Vorel, Disertační práce – Kompozity na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátů; Chemická fakulta – ústav chemie materiálů.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení betonového kalu.....9
Tabulka 2: Chemické složení strusky vyjádřené v oxidech 13
Tabulka 3: Kamenivo z laboratoře a z cihelny Řepov pro zkoušky směsí..... 15
Tabulka 4: Složky směsí a procentuálních poměrů kameniva a kalu..... 20
Tabulka 5: Tabulka pevností jednotlivých vzorků 20
Tabulka 6: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a cementu..... 23
Tabulka 7: Tabulka pevností jednotlivých vzorků 23
Tabulka 8: Složení směsi z kamenivy cihelny Řepov 25
Tabulka 9: Tabulka pevností vzorků v tlaku 26
Tabulka 10: Složení směsi (kamenivo a kal) z cihelny Řepov upravené složení. 27
Tabulka 11: Pevnosti v tlaku připravených směsí..... 27
Tabulka 12: Složky směsí a procentuálních poměrů metakaolinu a kalu 28
Tabulka 13: Tabulka pevností vzorků kal a metakaolin..... 29
Tabulka 14: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a strusky..... 32
Tabulka 15: Složky směsi a procentuálních poměrů kalu a strusky..... 33
Tabulka 16: Tabulka pevností jednotlivých vzorků 34
Tabulka 17: Složky směsí a jejich procentuální zastoupení..... 35
Tabulka 18: Tabulka pevností jednotlivých vzorků 36
Tabulka 19: Složky směsí a procentuální podíl hydroxidu sodného..... 38
Tabulka 20: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého..... 39
Tabulka 21: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého..... 40
Tabulka 22: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu draselného..... 41
Tabulka 23: Tabulka pevností jednotlivých vzorků při NZ 20 °C a 60 °C 41
Tabulka 24: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého..... 43
Tabulka 25: Tabulka tlakových pevností vzorků kalu a hydroxidu vápenatého 44
Tabulka 26: Složky směsí a procentuálních poměrů kalu a hydroxidu vápenatého..... 45
Tabulka 27: Tabulka pevností vzorků při NZ 20 °C 46
Tabulka 28: Složky směsí a jejich procentuální zastoupení..... 47
Tabulka 29: Směs ve složení kal a voda 49
Tabulka 30: Složení směsí..... 50
Tabulka 31: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání..... 50
Tabulka 32: Směs ve složení kal, hydroxid vápenatý a voda..... 51
Tabulka 33: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání..... 51
Tabulka 34: Směs ve složení kal hydroxid vápenatý a voda..... 52
Tabulka 35: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání..... 52
Tabulka 36: Směs ve složení upravený kal a voda..... 55
Tabulka 37: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání..... 55
Tabulka 38: Směs ve složení kal, hydroxid sodný a voda..... 56
Tabulka 39: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání..... 56
Tabulka 40: Směs ve složení kal, hydroxid vápenatý a voda..... 57
Tabulka 41: Pevnosti v tlaku vzorků při různé teplotě zrání..... 57
Tabulka 42: Směs ve složení kal s hydroxidem sodným, draselným a voda 59
Tabulka 43: Pevnosti v tlaku při různé teplotě zrání..... 59
Tabulka 44: Složení vzorků a pevnosti v tlaku při různé teplotě výpalu 61
Tabulka 45: Porovnání chemického složení kalu a PC slinku 63
Tabulka 46: Tlakové pevnostní charakteristiky vybraných kompozitů 67

Seznam grafů

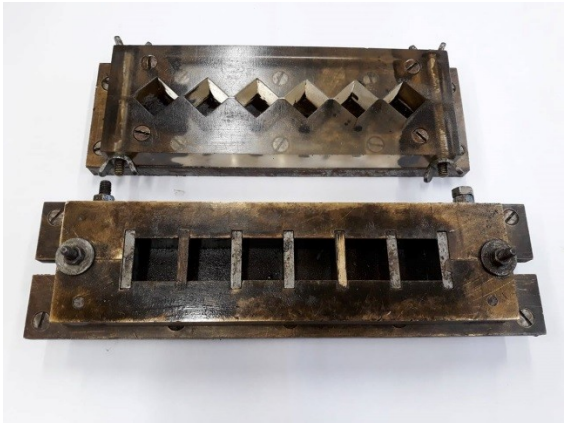
Graf 1: Granulometrické složení betonového kalu....8
Graf 2: Granulometrické složení jemně mleté vysokopecní strusky....13
Graf 3: Granulometrické složení sedleckého kaolinu I A....14
Graf 4: Použité kamenivo pro zkoušky....16
Graf 5: Pevnosti vzorků 1 s obsahem 14,4 g cementu....21
Graf 6: Pevnosti vzorků 2 s obsahem 28,8 g cementu....22
Graf 7: Pevnosti vzorků v poměru cementu a kalu za různých teplot....24
Graf 8: Pevnosti betonu z kameniva z cihelny Řepov a kalu....26
Graf 9: Pevnosti při upraveném jemnějším složení směsi....27
Graf 10: Pevnosti vzorků v poměru kalu a metakaolinu....29
Graf 11: Pevnosti vzorků v poměru strusky a kalu s NaOH....34
Graf 12: Pevnosti vzorků v poměru strusky a kalu s KOH....36
Graf 13: Pevnosti vzorků v poměru kalu a hydroxidu vápenatého....42
Graf 14: Pevnosti vzorků v poměru kalu a hydroxidu vápenatého při 60 °C....44
Graf 15: Pevnosti vzorků v poměru kalu a hydroxidu vápenatého....46
Graf 16: Pevnosti vzorků ve směsích s neupraveným betonovým kalem....53
Graf 17: Pevnosti vzorků ve směsích s upraveným betonovým kalem....58
Graf 18: Pevnosti vzorků v tlaku betonového kalu žíhaného s hydroxidem sodným a draselným....60
Graf 19: Pevnosti vzorků po výpalu směs jíl a betonový kal....61

Seznam obrázků

Obr. 1: RTG betonového kalu....7
Obr. 2: Mikrostruktura cementu a kalu....12
Obr. 3: RTG vzorku metakaolinu a betonového kalu v poměru 50 % kal : 50 % metakaolin.....30
Obr. 4: Vzorky zpevňované v suchém prostředí....31
Obr. 5: Vzorky se síranem sodným....48
Obr. 6: RTG tepelně upraveného betonového kalu....54
Obr. 7: Vzorky výpalu jíl s kalem....62
Obr. 8: Fotografie glazury vyrobené z betonového kalu....64

Pracovní pomůcky

Fotografické přílohy



Formy na výrobu zkušebních 6ti zkušebních vzorků o rozměru a = 20x20x20 mm 18x18x18 mm.



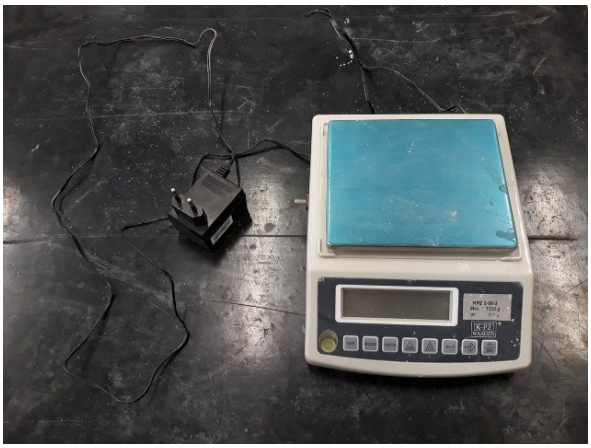
Zkušební lis na stanovení pevnosti vzorků v tlaku.



Horkovzdušná sušárna na sušení i pro hydrotermální zpracování vzorků.



Exikátor s vodní náplní pro normální zrání při laboratorní teplotě.



Digitální váha na přípravu navážek surovin do surovinových směsí.



Vibrolis na pomoc při míchání vzorků a zhutňování směsí



Elektrická pec pro tepelné úpravy surovin i vzorků.



Autokláv pro hydrotermální úpravy vzorků.