

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta stavební
Katedra materiálového inženýrství a chemie



Vliv druhu kameniva na vlastnosti sádrové malty

Influence of aggregate type on the properties of gypsum mortar

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Doc. Ing. Alena Vimmrová, Ph.D.

Praha, 2016/ 2017

Jitka Krejsová

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí Doc. Ing. Aleny Vimmrové, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování:

Děkuji své vedoucí diplomové práce, Doc. Ing. Aleně Vimmrové, Ph.D., za cenné rady, odborné připomínky a čas, který mi věnovala při zpracovávání této práce.

Děkuji také Doc. Ing. Martinovi Keppertovi, Ph.D. za chemickou analýzu použitých materiálů pomocí XRD a XRF, Ing. Magdě Doleželové za analýzu distribuce pórů a za dynamické změření sorpce, Ing. Petrovi Svorovi, Ph.D. za vyfotografování vzorků pomocí elektronového mikroskopu, Ing. Radce Pernicové, Ph.D. za změření drsnosti lomových ploch a Ing. Jaroslavovi Pokornému za rozbor jemných částic drobného kameniva.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům, kteří mi umožnili studovat, a svému manželovi Ing. Janu Krejsovi za podporu při zpracovávání diplomové práce.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Krejsová Jméno: Jitka Osobní číslo: 396570

Zadávací katedra: Materiálového inženýrství a chemie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv druhu kameniva na vlastnosti sádrové malty

Název diplomové práce anglicky: Influence of aggregate type on the properties of gypsum mortar

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši se zaměřením na výzkum tranzitní zóny mezi kamenivem a pojivem a na problematiku sádrových malt. Experimentálně zjistěte vliv různých druhů drobného kameniva na vybrané vlastnosti sádrové malty. Porovnejte tranzitní zónu mezi kamenivem a sádrou pro různé typy kameniv a vyhodnoťte její vliv na výsledné vlastnosti sádrových malt.

Seznam doporučené literatury:

Databáze WOS

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Alena Vimmrová, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 11.10. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1. 2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

11.10.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem různých druhů kameniva na fyzikálně-mechanické vlastnosti sádrových malt a ty porovnává s vlastnostmi sádry bez plniva. Zvláštní pozornost je věnována tranzitní zóně na rozhraní sádrové kaše a plniva. Byly zkoušeny čtyři sádrové směsi s různými typy drobného kameniva a jedna sádrová směs bez plniva. Z experimentů vyplývá, že tvar a povrch zrn významně ovlivňují tvar krystalů v tranzitní zóně a v důsledku toho i vlastnosti směsi. Směs s ostrohrannými zrny s drsným povrchem má vyšší pevnost a lepší přídržnost než směsi s oblými zrny. Kamenivo pozitivně ovlivňuje chování sádrové směsi při vysokých teplotách a výsledná cena materiálu je nižší.

Klíčová slova: *sádra, sádrová malta, drobné kamenivo, tvar zrn, tranzitní zóna, vlastnosti sádrové malty, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti, vlhkostní vlastnosti*

Abstract:

This thesis deals with the influence of the different types of aggregates on the physical-mechanical properties of the gypsum mortars. Gypsum mortars are compared with the gypsum paste. Special attention is paid to the transition zone between the gypsum paste and aggregate particles. Gypsum mixtures with four aggregate types and gypsum paste without aggregate were tested. Results show that the shape of crystals in transition zone is strongly influenced by the shape and surface of the particles and therefore also the properties of the material are influenced. The mixture with the sharp and rough particles has higher strength and adhesion than the mixtures with round particles. Aggregate have the positive influence on the behaviour of the material at high temperatures and also the final price of the material is lower.

Keywords: *gypsum, gypsum mortar, fine aggregate, grain shape, transition zone, gypsum mortar properties, mechanical properties, thermal properties, hygric properties*

Obsah

Seznam použitých symbolů	9
1 Úvod.....	10
2 Malta.....	11
2.1 Dělení malt.....	11
2.2 Pojivo	12
2.3 Sádra	14
2.3.1 Zdroje sádry.....	14
2.3.2 Výroba sádry	15
2.3.3 Hydratace sádry	16
2.3.4 Vlastnosti sádry	16
2.3.5 Požární chování sádry	17
Plnivo.....	20
2.3.6 Drobné kamenivo	21
2.3.7 Druhy kameniva	23
2.4 Tranzitní zóna	23
2.5 Průzkum tranzitní zóny pomocí elektronové mikroskopie	26
2.5.1 Princip elektronového mikroskopu	26
2.5.2 Určení prvkového složení pomocí elektronové mikroskopie.....	28
3 Experimentální část.....	29
3.1 Cíl práce	29
3.2 Měřené veličiny a metody měření.....	29
3.2.1 Zjišťování objemové hmotnosti drobného kameniva.....	29
3.2.2 Analýza distribuce jemných částic	29
3.2.3 Zjištění chemického složení sádry pomocí rentgenové fluorescence	30
3.2.4 Zjištění chemického složení kameniva pomocí XRD	30
3.2.5 Průzkum tranzitní zóny	30
3.2.6 Hodnota rozlití.....	30
3.2.7 Počátek a konec tuhnutí.....	31
3.2.8 Zjišťování objemové hmotnosti zkušebních těles	31
3.2.9 Hustota, pórovitost a distribuce velikosti pórů.....	32
3.2.10 Přídržnost	32
3.2.11 Pevnost v tahu za ohybu	34
3.2.12 Pevnost v tlaku	34
3.2.13 Tepelná vodivost	35
3.2.14 Tepelná kapacita.....	35
3.2.15 Difúze vodní páry	36
3.2.16 Dynamické měření sorpce	37
3.2.17 Analýza drsnosti na lomové ploše.....	38
3.2.18 Chování při vysokých teplotách	40
3.2.19 Vyhodnocení výsledků pomocí Dean - Dixonovo testu.....	40

3.3	Materiály pro výrobu směsí	41
3.3.1	Šedá stavební sádra	41
3.3.2	Kamenivo	42
3.3.3	Kyselina citronová.....	44
3.4	Návrh složení sádrových maltových směsí	44
3.5	Pracovní postupy.....	45
3.5.1	Prosévací zkouška a sjednocení zrnitosti kameniva.....	45
3.5.2	Výroba zkušebních těles.....	46
3.6	Výsledky měření a diskuze	47
3.6.1	Analýza distribuce jemných částic	47
3.6.2	Průzkum tranzitní zóny	47
3.6.3	Hodnota rozlité a počátek tuhnutí	51
3.6.4	Objemová hmotnost	53
3.6.5	Pórovitost a distribuce pórů.....	54
3.6.6	Přídržnost	56
3.6.7	Pevnost	58
3.6.8	Tepelné a difúzní vlastnosti.....	60
3.6.9	Dynamické měření sorpce	63
3.6.10	Analýza drsnosti na lomové ploše.....	68
3.6.11	Chování při vysokých teplotách	70
3.6.11.1	Objemová hmotnost.....	70
3.6.11.2	Mechanické vlastnosti.....	71
3.6.11.3	Vizuální hodnocení	73
3.7	Orientační ceník navržených směsí.....	74
4	Závěr.....	75
	Seznam obrázků	84
	Seznam tabulek.....	86

Seznam použitých symbolů

A	[mm ²]	plocha
c	[J/(kg·K)]	měrná tepelná kapacita
c_v	[J/(m ³ ·K)]	objemová tepelná kapacita
D	[m ² /s]	součinitel difúze pro vodní páru
E	[GPa]	modul pružnosti
F	[N]	síla
f_u	[N]	přídržnost
h	[–]	hutnost
l	[mm]	délka
m	[kg]	hmotnost
M	[g/mol]	molární hmotnost
N	[s]	přibližný difúzní odpor vzduchu
p_p	[Pa]	parciální tlak
Q	[J]	teplo
R	[J/(K·mol)]	univerzální plynová konstanta
R_a	[μm]	střední aritmetická drsnost
R_c	[MPa]	pevnost v tlaku
R_f	[MPa]	pevnost v tahu za ohybu
SR_a	[μm]	střední aritmetická výška drsnosti
t	[s]	čas
T	[K]	termodynamická teplota
V	[m ³]	objem
w	[–]	vodní součinitel
α	[K ⁻¹]	lineární součinitel tepelné roztažnosti
δ	[s]	součinitel difúzní vodivosti
λ	[W/(m·K)]	součinitel tepelné vodivosti
μ	[–]	faktor difúzního odporu
ρ	[kg/m ³]	hustota
ρ_v	[kg/m ³]	objemová hmotnost
φ	[–]	relativní vlhkost
ψ	[–]	celková pórovitost

1 Úvod

Sádra je stavební materiál známý tisíce let. Byla používána při stavbě pyramid ve starověkém Egyptě a v některých konstrukcích se dochovala přes 5 000 let do dnes [1].

Díky svým výtečným požární vlastnostem se využití sádry v Evropě rychle rozšířilo zejména po velkém požáru v Londýně (v 17. století), kdy aplikaci sádry jako požární ochrany některých konstrukcí dokonce nařizovala tehdejší legislativa. Ve druhé polovině 19. století započala výroba sádrokartonových desek. Během 1. světové války byla věnována velká pozornost jejich požární odolnosti, protože armáda začala hledat řešení, jak předejít nehodám způsobeným požárem [1]. Sádrové desky mají kromě dobré požární odolnosti a rychlé výstavby i další přednosti, mezi které patří zejména malá objemová hmotnost. Díky tomu našly uplatnění i při stavbě nejvyšších mrakodrapů své doby, např. John Hancock Tower a Sears Tower [1].

Dnes je sádra v interiérech široce uplatňována, a to v různých podobách. Z tradičních prvků lze jmenovat sádrokartonové desky různých druhů, sádrové ozdobné doplňky (rozety, konzoly), sádrové omítky a anhydritové podlahy. Za zmínku stojí i některé méně tradiční prvky, jako jsou sádrová svítidla [2], sádrobetonové schody a sádrové tvarovky [3]. Poměrně výjimečným výrobkem je sádrová směs speciálně určená k míchání s pískem (případně s jiným plnivem) od společnosti National Gypsum [4]. Vzniklá malta se pak používá především jako podkladní vrstva omítky a mezi její výhody patří možnost nanášení strojně i ručně, dobrá zpracovatelnost a zvýšená mechanická odolnost zejména vůči nárazům a abrazi.

Sádra je z dnešního pohledu oceňována i díky dalším aspektům, mezi které patří hladký povrch výrobků, který lze v případě narušení snadno opravit bez zanechání stop, rychlý nárůst pevnosti, nízká tepelná vodivost, malé objemové změny během hydratace, schopnost regulace vlhkosti v interiéru, velká vydatnost (souvisí s vysokým obsahem pórů a molekul vody ve struktuře zatvrdlé hmoty), ekologická výroba (sádra vzniká jako odpad při odsiřování spalin v tepelných elektrárnách a jako odpad v chemickém průmyslu; v případě výroby pálením přírodního vápence, tzv. kalcinaci, stačí poměrně nízká teplota - asi 150 °C) a možnost recyklace.

Právě na ekologii a nízkou cenu stavebních materiálů je vzhledem k požadavkům dnešní společnosti kladen stále větší důraz. Z těchto dvou hledisek se jeví jako vhodný materiál sádrová malta (sádrová kaše s drobným kamenivem), popř. sádrový beton, protože při použití

kameniva dojde ke snížení spotřeby sádrového pojiva a k poklesu ceny hmoty. Získávání písku jako drobného kameniva je energeticky poměrně málo náročné, protože písek po vytěžení (případně po drcení kamene) už nemusí být téměř upravován. Sádra s plnivem se zatím příliš často nepoužívá, protože to vzhledem k malým objemovým změnám během hydratace není nutné. Širšímu využití sádry s plnivem brání i nedostatek informací o jejím chování a vlastnostech. V některých zdrojích je popsáno chování sádrového pojiva s některými druhy alternativních plniv, jako je drcený kaučuk ze starých pneumatik [5], ale vliv typu, složení a tvaru částic písku jako jemného plniva na vlastnosti sádrové hmoty zatím v dostupných zdrojích není podrobně popsán. Proto se tato práce zabývá návrhem vhodných sádrových směsí, porovnáním vlastností sádrové kaše bez písku a sádrové malty s pískem a popsáním účinku různých druhů písků na vlastnosti sádrové malty. Zvláštní pozornost je věnována tranzitní zóně na rozhraní sádrové kaše a drobného kameniva.

Touto prací částečně navazují na svou bakalářskou práci na téma „Návrh a ověření vlastností lehké sádrové hmoty s kamenným prachem“, na kterou se v některých kapitolách této práce odkazují, aby tyto kapitoly nemusely být znovu podrobně rozebírány.

2 Malta

Malta je stavební materiál obsahující drobné kamenivo, pojivo a vodu. Kromě těchto složek může malta obsahovat přísady a příměsi [6]. Písady a příměsi ve vztahu k sádrovým maltám jsou podle ČSN EN 13279-1 [7] látky, jako jsou plniva, vlákna, pigmenty, stavební vápno (< 5 %), látky zpomalující tuhnutí, provzdušňující látky, látky zvyšující retenci vody a plastifikátory, přidávané k sádrovým maltám pro zlepšení jejich vlastností nebo dosažení vlastností speciálních. Kamenivo a pojivo nejsou považovány za přísady a příměsi.

2.1 Dělení malt

Pokud se všechny složky malty mísí na staveništi, jedná se o staveništní maltu. Dnes je běžnější tzv. suchá maltová směs, což je předem vyrobená směs drobného kameniva, pojiva, případně přísad a příměsí, která se na staveništi jen smísí s vodou.

Podle účelu použití jsou malty nejčastěji rozdělovány na dvě hlavní skupiny – malty pro omítání a malty pro zdění [6], nebo na tři skupiny – ložné malty, malty pro venkovní omítky (dají se využít i v interiéru, ale obvykle obsahují vyšší podíl cementu a zhoršují pohodu bydlení) a malty pro vnitřní omítky (se sníženou odolností vůči povětrnostním podmínkám)

[8, 9]. Podle účelu lze vyčlenit ještě několik menších skupin, např. sanační a injektážní malty, podlahové/potěrové malty, stříkané malty a zvláštní podkladní materiály.

Malty lze rozlišovat také podle složení:

- podle druhu pojiva (hliněné, vápenné a vápenohořečnaté, nastavované, hydraulické, polymerní apod.),
- podle druhu plniva (s říčním pískem, s kopaným pískem, se smíšeným plnivem a s druhotnými odpadními hmotami) a
- podle druhu přísad (s urychleným nebo prodlouženým tuhnutím, plastifikované, provzdušněné, hydrofobní) [8].

Podle velikosti zrn plniva jsou rozlišovány malty hrubé (zrna nad 6 mm), ostré (zrna 2 – 6 mm), střední (zrna 0,5 – 2 mm), jemné (zrna 0,2 – 0,5 mm) a štukové (zrna do 0,2 mm) [8]. Větší zrna jsou přidávána do hrubých omítek, především do podhozu (tzv. špricu), který plní funkci spojovacího můstku mezi zdivem a omítkou [10], a do tzv. jádrových omítek, které slouží k vyrovnání podkladu, případně ke speciálním účelům (sanační, tepelněizolační). Štuková malta je vhodná pro finální vrstvy omítky a na rozdíl od jádrových omítek bývá nanášena v tenkých vrstvách [9]. Některé štukové omítky mohou také plnit tepelně-izolační funkci. V souvislosti se zmíněnými vrstvami malt pro omítání jsou rozlišovány omítkové systémy jednovrstvé a vícevrstvé [9].

Malty pro omítání jsou dále rozlišovány podle techniky nanášení na strojně nanášené (na které jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska křivky zrnitosti a přísad) a na ručně nanášené [9].

2.2 Pojivo

Pojivo je látka anorganického či organického původu, která umožňuje spojení menších kousků, tzv. plniv, ve větší celky [9]. Pojivo je nejprve upraveno do tekuté až kašovitě konzistence. Pak nastává proces zpevňování [11], který lze rozdělit na dvě fáze – tuhnutí a tvrdnutí. Podle toho, jestli k procesu zpevňování může docházet jen na vzduchu nebo i ve vodě, se pojiva dělí na vzdušná a hydraulická. Hydraulická pojiva mohou po počátečním zatuhnutí dále tuhnut i tvrdnout ve vodě. Vzdušná pojiva tvrdnou jen na vzduchu a po zatvrdnutí jsou málo odolná vůči vodě.

Do konce 19. století byly jako pojiva využívány převážně tři materiály – hlína, vápno a sádra [12]. Hlína s vysokým obsahem jílu (např. kaolinit, montmorillonit, hallosysit a illit)

bývá označována za nejstarší stavební pojivo. Oproti ostatním pojivům, která byla nebo jsou hojně využívána, je hlína jedinečná tím, že tuhnutí a tvrdnutí neprobíhá chemicky, ale fyzikálně, tedy na principu koloidního vysychání [6]. Hlinité malty jsou charakteristické vrstevnatou strukturou, bobtnáním při kontaktu s vodou, velikostí zrn do 2 μm a velkým smršťováním při vysychání [12]. Smrštění je částečně redukováno neplastickými složkami obsaženými v hlínách. Tyto složky působí jako ostřívo, tedy přenášejí tahová napětí a zamezují vzniku trhlin. Pro redukcii smrštění mohou být také přidávány výztužné materiály, jako je sláma, seno, jehličí, piliny apod. Hliněné malty jsou také charakteristické stálostí v suchém prostředí. Ve vlhkém prostředí degradují zejména kvůli solím rozpuštěným ve vodě. Po odpaření vody soli vykrystalizují a tím způsobují velké tlaky na okolní hmotu [12]. Kapalná vlhkost také ohrožuje omítku při nízkých teplotách, kdy hrozí zamrznutí vody spojené s nárůstem objemu vody a rozpadem omítky.

Za druhé nejdéle známé pojivo je považována sádra, která byla používána již před několika tisíci lety v Egyptě, Číně a Indii [12]. Ve středověku našla své uplatnění především jako základ umělého mramoru v interiéru honosných budov. Tato tzv. mramorová sádra [13] byla pálena dvakrát a před druhým výpalem byla napouštěna solemi. Díky tomu dosahovala vysoké pevnosti a bylo ji možné brousit a leštit. V 17. století byla sádra doceněna hlavně pro své dobré požární chování. Sádrou se podrobně zabývá kapitola 2.3 níže.

Nejrozšířeněji používané pojivo v maltách do 20. let minulého století je vápno [12]. Jedná se o vzdušné pojivo, které se vyrábí pálením vápence v šachtových nebo rotačních pecích při teplotách 1 050 až 1 250 $^{\circ}\text{C}$ podle rovnice (1), případně pálením dolomitu podle rovnice (2) [12]:



Reakcí takto získaného vápna (páleného vápna, CaO) s vodou, tzv. hašením, vzniká hašené vápno $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Hašené vápno na vzduchu karbonatuje, a tím strukturně přechází na pevnější formu (CaCO_3) podle rovnice (3):



Pro zlepšení vlastností (zejm. pevnosti a odolnosti) vápenných malt je možné přidat pucolány, tedy křemičité nebo hlinito-křemičité látky, které získávají výrazné pojivové

vlastnosti až po reakci s vodou a Ca(OH)_2 . Příklady přírodních pucolánů jsou tufy, tras, penza a křemelina. Mezi umělé pucolány patří popílky, cihelný prach, metakaolin, křemičitý úlet aj. Kromě pucolánů jsou pro zlepšení pevnosti a odolnosti do vápna někdy přidány hydraulické přísady, nejčastěji cement nebo struska. [12]

Zvláštním druhem vápna je vápno hydraulické, které se díky hydraulickým oxidům (SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3) chová podobně jako cement - má vyšší pevnost, vyšší odolnost a je odolné vůči vodě [12].

V porovnání s vápennými, sádrovými a hliněnými maltami je poměrně novým typem malta cementová, která se významně začala uplatňovat až ve 20. století [10, 12]. Základem cementové malty bývá portlandský (případně struskoportlandský) cement, což je hydraulické pojivo vzniklé rozemletím křemičitého slínku se sádrovcem jako hlavní přísadou. Pevná struktura cementu pak vzniká jeho hydratací. Výhodou cementových malt je kromě hydraulicity také vysoká pevnost, tvrdost a trvanlivost [10]. Naopak nevýhodou je vysoký difúzní odpor a poměrně vysoká cena.

Malty mohou obsahovat i kombinaci pojiv, jako jsou vápno a sádra, hlína a sádra apod. Takové malty, které obsahují dvě pojiva, jsou označovány jako malty nastavované [14].

Kromě zmíněných anorganických pojiv se lze v dnešní době setkat i s makromolekulárními pojivy, případně s kombinací makromolekulárních a anorganických pojiv [6].

2.3 Sádra

Sádra je anorganické vzdušné pojivo. Z chemického hlediska se jedná o hemihydrát síranu vápenatého ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) [6]. Následující podkapitoly popisují její zdroje, výrobu, hydrataci a vlastnosti (zejména požární chování). Tato kapitola se nezabývá dělením sádry, využitím sádry ve stavebnictví, možnostmi lehčení sádry a použitím kyseliny citronové jako zpomalovače, protože o těchto tématech se podrobněji zmiňuji v [15] a částečně v jiných kapitolách této práce.

2.3.1 Zdroje sádry

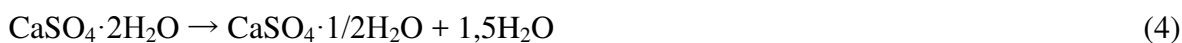
Přírodním zdrojem sádry je sedimentární hornina sádrovec, která obsahuje stejnojmenný minerál ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Přírodní sádrovec bývá znečištěn jinými látkami (jílovými, břidlicí, anhydritem, křídou, křemenem, magnezitem, sloučeninami železa apod.) [6, 16], které ovlivňují jeho barvu [16] a vlastnosti. Některé formy sádrovce jsou známé jako alabastr, selenit nebo mariánské sklo. V čisté formě je sádrovec bílý nebo bezbarvý, má objemovou

hmotnost cca 2 300 kg/m³ a obsahuje 20,9 % hm. chemicky vázané vody [6]. Ložiska přírodního sádrovce vznikla především vysrážením mořské vody, a v menší míře také zvětráváním sulfidů [15]. Ložisek sádrovce je ve světě je velké množství. V ČR se v současnosti těží výhradně v okolí Opavy.

Kromě přírodního sádrovce je významným zdrojem sádry umělý sádrovec, který vzniká jako odpadní produkt v řadě průmyslových provozů. Nejvýznamnějším zdrojem umělého sádrovce jsou tepelné elektrárny, ve kterých tzv. energosádrovec vzniká při odsiřování spalin v tepelných elektrárnách [6]. Dalším typem umělého sádrovce je chemosádrovec (vedlejší produkt z chemického průmyslu), který lze podle původu dále rozlišovat např. na fosfosádrovec a titanosádrovec. Podobně jako přírodní sádrovec i umělý sádrovec obsahuje obvykle řadu nežádoucích příměsí.

2.3.2 Výroba sádry

Proces výroby sádry ze sádrovce je nazýván kalcinace [6]. Jedná se o dehydrataci sádrovce (CaSO₄·2H₂O) podle rovnice (4) při teplotách okolo 150 °C.



Pokud kalcinace probíhá za normálního tlaku, vzniká tzv. β-sádra. V případě, že kalcinace probíhá při zvýšeném tlaku a při současném nasycení vodní parou, vzniká tzv. α-sádra. Ta je obecně považována za kvalitnější pojivo, protože díky hutnější struktuře, dokonalejším krystalům a pravidelnějšímu uspořádání krystalické mřížky dosahuje po zatvrdnutí vyšší pevnosti [17]. Kromě toho se α-sádra liší od β-sádry většími částicemi, menším měrným povrchem, pomalejším nárůstem pevnosti a menší spotřebou záměsové vody [17]. Podrobněji jsou některé rozdíly mezi oběma formami popsány v [15].

Pokud je žádoucí vyrobit sádru s určitým podílem anhydritu, případně jen anhydrit, jsou zapotřebí vyšší teploty. Strukturní změny při vysokých teplotách jsou podrobněji popsány v 2.3.5.

2.3.3 Hydratace sádry

Z chemického hlediska je hydratace opačným procesem než dehydratace a lze ji vyjádřit rovnicí (5) [16]:



Po vsypání sádry do vody a po zamíchání vzniká přesycený roztok, ze kterého krystalizuje $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a uvolňuje se teplo. Krystaly sádry vzájemně prorůstají a drží hmotu pohromadě. Sádrová suspenze tedy postupně ztrácí tekutost a přechází do tuhého stavu [16]. Ve spojení s hydratací sádry jsou z praktického hlediska důležité dvě fáze. První z nich, tzv. tuhnutí, začíná momentem, kdy už sádrová kaše není tekutá, popř. plastická. Tuhnutí lze prodloužit zvýšením obsahu anhydritu v sádrovém pojivu (resp. zvýšením teploty výpalu sádrového pojiva), zkrácením doby míchání, zvýšením vodního součinitele, snížením teploty záměsové vody, nebo přidáním zpomalovačů tuhnutí. Tuhnutí končí úplným zatuhnutím suspenze, kdy už lehce přitlačený předmět na povrchu nezanechává žádné stopy. V té chvíli začíná fáze tvrdnutí, během které dochází k nárůstu pevnosti směsi.

Z hlediska vývoje mikrostruktury lze hydrataci sádry rozdělit do tří period [16]. V první (indukční) periodě se v přesyceném roztoku tvoří zárodky dihydrátu (volně nebo na zrnech hemihydrátu). S rostoucím počtem zárodků roste rychlost tvorby dalších zárodků. Při této periodě nedochází k uvolňování hydratačního tepla [18]. Ve druhé (hlavní) periodě dochází k hydrataci hemihydrátu a k růstu krystalů dihydrátu. Přitom roste viskozita a uvolňuje se hydratační teplo. Na konci druhé periody je ze směsi tuhá látka. Ve třetí periodě dochází v zatím ještě vlhké sádrové hmotě k rekrystalizaci a další krystalizaci dihydrátu. Další krystaly vznikají uvnitř hmoty z vodného roztoku při sušení, což vede také ke zvýšení pevnosti.

2.3.4 Vlastnosti sádry

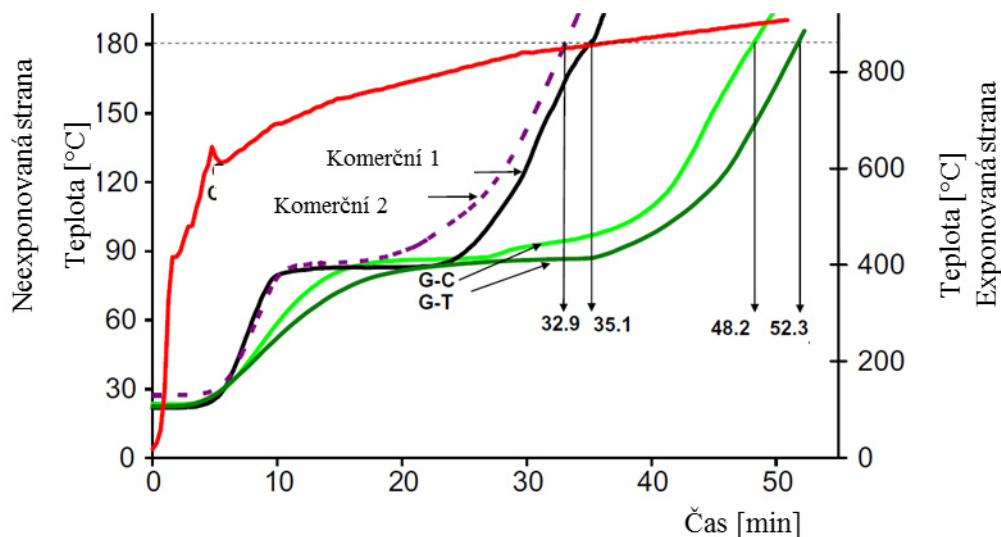
Některé vlastnosti sádry, které lze vyjádřit číselně jsou uvedeny v Tab. 1. Tyto vlastnosti závisí na mnoha faktorech, jako je čistota výchozí suroviny, technologie výroby, podmínky při tuhnutí a tvrdnutí, vodní součinitel, přísady a příměsi apod. Z tohoto důvodu jsou v tabulce uvedena širší rozpětí hodnot pro běžně používanou sádru. Podrobněji jsou některé vlastnosti popsány v [15].

Tab. 1: Vlastnosti sádry

VELIČINA	SYMBOL	JEDNOTKY	HODNOTA	ZDROJ
Nárůst objemu během hydratace	ΔV	[%]	0,1 – 1	[1]
Pevnost v tlaku	R_c	[MPa]	2 - 30	[18]
Modul pružnosti	E	[GPa]	2 - 6	[1]
Vodní součinitel	w	[-]	0,6 - 0,8	[1]
Součinitel tepelné vodivosti	λ	[W/(m·K)]	0,18 - 0,56	[18]
Měrná tepelná kapacita	c	[J/(kg·K)]	840 - 1050	[1]
Objemová hmotnost	ρ	[kg/m ³]	600 - 1200	[18]
Lineární součinitel tepelné roztažnosti	α	[K ⁻¹]	20·10 ⁻⁶	[1]
Faktor difúzního odporu	μ (<i>dry</i>)	[-]	4	[18]
Faktor difúzního odporu	μ (<i>wet</i>)	[-]	10	[18]

2.3.5 Požární chování sádry

Velká odolnost sádry při požáru je dána především složením a strukturou sádry. Molekula zatuhlé sádry ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) obsahuje velké množství vody. Kromě chemicky vázané vody sádra obsahuje i vodu v pórovém systému. Voda se při vysoké teplotě vypařuje, přičemž díky svému velkému skupenskému teplu vypařování pohlcuje značnou část tepelné energie. Chemicky vázaná voda se uvolňuje už při teplotách nad 40 až 60 °C, kdy vzniká hemihydrát ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) [19]. K tomu dochází nejprve na povrchu sádry. Uvolněná voda vytváří vnitřní clonu, která zabraňuje rychlému zvyšování teploty uvnitř materiálu. Dokud se vodní clona neodpaří, nedochází ke zvýšení okolní teploty v materiálu nad 100 °C. Tento děj bývá označován jako izotermický jev [19] a je patrný na Obr. 1. Obrázek převzatý z [20] vyjadřuje rychlost transportu tepla čtyř různých panelů na bázi sádry (Komerční 1, Komerční 2, G-C a G-T) o tloušťce 2 cm, výšce 28 cm a délce 18 cm. Exponovaná strana byla vystavena teplotám podle normové požární křivky (na Obr. 1 červeně) a bylo měřeno, za kolik minut dosáhne neexponovaná strana 180 °C. Je patrné výrazné zpomalení nárůstu teploty sádrových panelů na neexponované straně ve srovnání s normovou požární křivkou.



Obr. 1: Izolační schopnost sádry při požáru, převzato z [20]

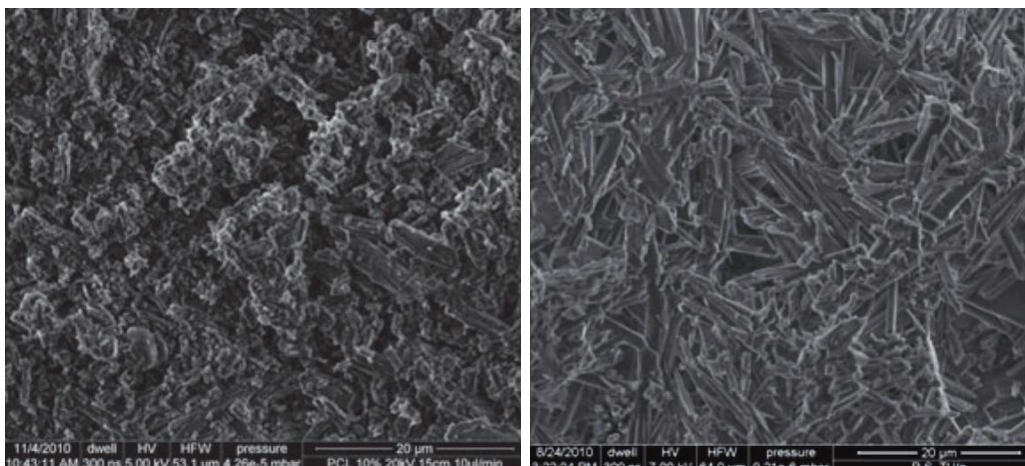
Rychlému šíření vysoké teploty v sádře brání nejen obsah vody, ale částečně i tepelně-izolační vlastnosti sádry, které jsou v porovnání např. s betonem velmi dobré a při dehydrataci se ještě zlepšují vlivem zvyšující se pórovitosti sádry [21].

Při teplotách nad 100 °C postupně dochází k úplnému odvodnění sádry a ke vzniku různých forem anhydritu (CaSO_4). Tyto děje vyjadřuje Tab. 2 a blíže jsou popsány v 3.6.11. Je třeba dodat, že hraniční teploty se v různých zdrojích liší.

Tab. 2: Strukturální přeměny sádry při teplotách nad 100 °C [6]

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
↓ 150 °C ↓	
Prostředí nasycené vodní parou, zvýšený tlak	Prostředí nenasycené vodní parou, normální tlak
$\alpha - \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	$\beta - \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
200 - 210 °C ↓	170 - 180 °C ↓
$\alpha - \text{CaSO}_4 \text{ III } (\alpha\text{-A III})$	$\beta - \text{CaSO}_4 \text{ III } (\beta\text{-A III})$
nad 200 °C ↓	
$\text{CaSO}_4 \text{ II } (\text{A II-T, A II-N, A II-E})$	
nad 800 °C ↓	
$\text{CaSO}_4 \text{ I } (\text{A I})$	
Rozklad na CaO a SO_3	

Změny v mikrostruktuře sádry po zatížení vysokou teplotou jsou pozorovatelné pomocí elektronového mikroskopu, což je patrné např. z fotografií na Obr. 2 [22], kde je sádrová deska vyrobená z β – hemihydrátu po zatížení teplotou 80 °C (vlevo) a po zatížení teplotou 120 °C (vpravo).



Obr. 2: Mikrostruktura sádrové desky z β – hemihydrátu po zatížení 80 °C (vlevo) a 120 °C (vpravo) převzato z [22]

Z požárního hlediska je důležité, že dehydratace sádry je endotermní reakce a sádra tak při požáru nehoří. Nejsou uvolňovány žádné škodlivé plyny, ani nedochází k výbuchům. Díky tomu jsou výrobky ze sádry řazeny do třídy reakce na oheň A1 (např. v případě sádrových tvárníc a sádrovláknitých desek) nebo A2 (např. běžný protipožární sádrokarton) a jsou vhodné pro vnitřní konstrukce a jejich součásti (nenosné příčky, omítky, malty, protipožární nátěry apod.). Výborné chování sádry při požáru bylo potvrzeno v roce 2008 při požární zkoušce v Mokrsku [21], kde byla kromě jiných konstrukcí zkoušena i stěna ze sádrových bloků od firmy GYPSTREND se sádrovou omítkou PRO GYPSUM (Obr. 3). Po požáru tato experimentální stěna vypadala téměř neporušeně, přičemž největší vizuálně patrné porušení bylo způsobeno pádem jiných konstrukcí (Obr. 4). Sádra se při požární zkoušce osvědčila i jako vhodná protipožární ochrana jiných konstrukcí.

Nevýhodou sádrových výrobků při požáru je značný pokles pevnosti, kterým se zabývá kapitola 3.6.11. V této kapitole je popsán i vliv křemene v sádrové maltě na změnu vlastností sádry při vysokých teplotách. Chování sádry při požáru zatím bylo zkoumáno jen v omezené míře. Dostupné zdroje (např. [23, 24]) jsou zaměřeny především na účinek vysokých teplot na fyzikální a mechanické vlastnosti sádrokartonových desek.



Obr. 3: Stěna ze sádrových bloků před požární zkouškou [25]



Obr. 4: Detail stěny ze sádrových bloků po požární zkoušce [26]

Plnivo

Pokud je plnivo do sádrového pojiva přidáváno, jedná se obvykle o frakce 0 – 2 mm. Pro zvýšení pevnosti je jako plnivo někdy přidáván anhydrit (případně vápenec), protože mezi sádrovcem a anhydritem vznikají zvláště silné mezikystalové síly [16]. Lehká plniva, jako keramzit a strusková pemza, bývají využívána k lehčení sádrové hmoty. V případě sádry je možné jako plniva využít také organické látky, na rozdíl od cementu, ve kterém neošetřená (nemineralizovaná) organická plniva způsobují výrazný pokles pevnosti.

S rostoucím obsahem plniva klesá množství chemicky i fyzikálně vázané vody v sádrové hmotě. To vede k lepšímu vysychání materiálu a k rychlejšímu dosažení rovnovážné vlhkosti [16].

2.3.6 Drobné kamenivo

Kamenivo je podle ČSN EN 13279-1 [7] definováno jako přírodní, umělá nebo recyklovaná látka vhodná pro stavební použití např. pórovité kamenivo jako perlit, nebo vermikulit či drobné kamenivo křemičité nebo drcené drobné kamenivo vápenaté. Kamenivo nejčastěji zastává funkci plniva a vzájemným opřením a zaklíněným zrn zajišťuje vytvoření pevné kostry [6]. Do malt se přidává zejména proto, že redukuje smršťování, snižuje množství trhlin způsobených vysycháním a při vhodném dávkování zvyšuje pevnost [27].

Pojem drobné kamenivo je složitější přesně vymezit, jelikož různé normy definují drobné kamenivo různě. Obvykle tak bývá označeno kamenivo, které propadne sítím o normou definované velikosti. Tato velikost se liší nejen v normách jednotlivých států, ale i v rámci platných českých norem, např. podle ČSN EN 13043 [28] je uvažována 2 mm a podle ČSN EN 12620 [29] a ČSN EN 13139 [30] je 4 mm. Speciálně kamenivem do malty se zabývá ČSN EN 13139 [30].

Vlastnosti použitého kameniva značně ovlivňují i vlastnosti výsledné hmoty, proto je důležité kamenivo specifikovat. Obecné požadavky na kamenivo jsou uvedeny v normách, zatímco zvláštní požadavky je potřeba uvést do projektové dokumentace.

Zmíněné požadavky lze dělit na požadavky na [29]:

- geometrické vlastnosti (frakce kameniva, zrnitost, tvar zrn, hodnocení jemných částic),
- fyzikální vlastnosti (odolnost proti drcení, otěru, ohladitelnosti a obrusu, objemová hmotnost a nasákavost, sypaná hmotnost a trvanlivost) a
- chemické vlastnosti (obsah chloridů, síranů a dalších složek).

V této práci jsou zohledněny především geometrické požadavky, proto jsou v následujících odstavcích upřesněny některé pojmy, které se jich týkají.

Zrnitost je skladba zrn kameniva podle hmotnostního propadu specifikovanou sadou sít. Pro stanovení zrnitosti drobného kameniva se podle normy pro kamenivo do betonu ČSN EN 12620 [29] používá sada sít o velikosti otvorů [mm]: 4; 2; 1; 0,25 a 0,063. V případech, kdy je potřeba určit podrobněji zrnitost jemných částic, nelze použít síťový rozbor. Místo síťového rozboru se v takovém případě používají např. sedimentační metody nebo laserová difrakční

analýza. Grafickým vyjádřením zrnitosti je křivka zrnitosti, tedy graf, ve kterém svislá osa vyjadřuje propad sítem [% hm.] a vodorovná osa vyjadřuje velikost otvoru síta [mm]. Jako pomůcka pro návrh zrnitosti existují doporučené křivky zrnitosti pro kameniva s různou maximální frakcí [31,32].

Frakce je označení kameniva podle velikosti dolního (d) a horního (D) síta vyjádřené jako d/D [29, 30]. Frakce d/D může obsahovat i určité množství zrn, která zůstanou na horním sítu (D) – tzv. nadsítné, a určité množství zrn, která propadnou dolním sítem (d) – tzv. podsítné.

Modul zrnitosti (k modul, nazývaný také Abramsův) je setina součtu procentních zůstatků směsi kameniva stanovených na rozšířené základní sadě sít (0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 64). Někdy je udáván D modul (Rothfuchsovo číslo), což je součet procentních propadů směsi kameniva stanovených na rozšířené základní sadě sít. Oba moduly vyjadřují jemnost kameniva a při návrhu kameniva bývá předpokládáno, že kameniva se stejným modulem potřebují stejné množství vody na ovlhčení povrchu. [31]

Tvar zrn lze hodnotit pomocí tvarového indexu, tedy podílu zrn [% hm.], které mají poměr největšího a nejmenšího rozměru větší než 3 [6]. Toto kritérium je však obtížně aplikovatelné na drobné kamenivo, proto je v případě drobného kameniva vhodnější posuzovat povrch zrn, případně použít šterbinová síta [6]. Tvar zrn ovlivňuje zpracovatelnost i pevnost výsledné hmoty. V případě betonu platí, že drcené kamenivo s drsným povrchem se lépe spojuje s cementovým tmelem, a proto betony s drceným kamenivem dosahují vyšších pevností, avšak za cenu horší zpracovatelnosti a potřeby intenzivnějšího hutnění [6]. Podle [33] zrna drceného kameniva nesmí obsahovat příliš nekubických zrn (podlouhlých, destičkovitých), která jsou málo pevná a zvyšují potřebu záměsové vody. To potvrzuje i [34], podle kterého je vhodné hrubé kamenivo s tvarovým indexem blízkým hodnotě 1. V případě drobného kameniva je podle [35] nejvhodnější těžené prané kamenivo s plynulou křivkou zrnitosti. Vhodné je i drcené kamenivo, pokud neobsahuje velké množství jemných částic, které také zhoršují zpracovatelnost.

V praxi jsou rozdíly ve tvaru zrn drobného kameniva obvykle zanedbávány. K zanedbání tvaru drobného kameniva se přiklání i norma ČSN EN 13139 [30], podle které tvar zrn o velikosti do 4 mm není pro vlastnosti malty významný.

2.3.7 Druhy kameniva

Kamenivo lze dělit podle objemové hmotnosti na lehké (do 2 000 kg/m³), hutné (2 000 až 3 000 kg/m³) a těžké (nad 3 000 kg/m³) [31]. Další skupiny lze vyčlenit podle velikosti zrn, jak je patrné v Tab. 3. Tato tabulka byla sestavena podle [31].

Tab. 3: Dělení kameniva podle velikosti zrn [31]

Velikost zrn	Typ kameniva podle velikosti	Příklad
0 až 0,063 mm	-	filer
0 až 0,25 mm	jemné	moučka, filer ¹ , příměs
0 až 4 mm	drobné	písek
4 až 63 mm	hrubé	drť, štěrk
-	směs kameniva	štěrkopísek, štěrkodrt'

Podle původu je rozlišováno kamenivo přírodní (říční, kopané, drcené, morénové, mořské, sopečné), umělé (keramzit, expandovaný perlit) a recyklované (drcené cihly, beton). S tímto dělením souvisí pojem štěrkopísek, který zahrnuje drobná kameniva, jejichž částice byly rozdrceny silou vody, a která se těží z vody nebo z těžební stěny.

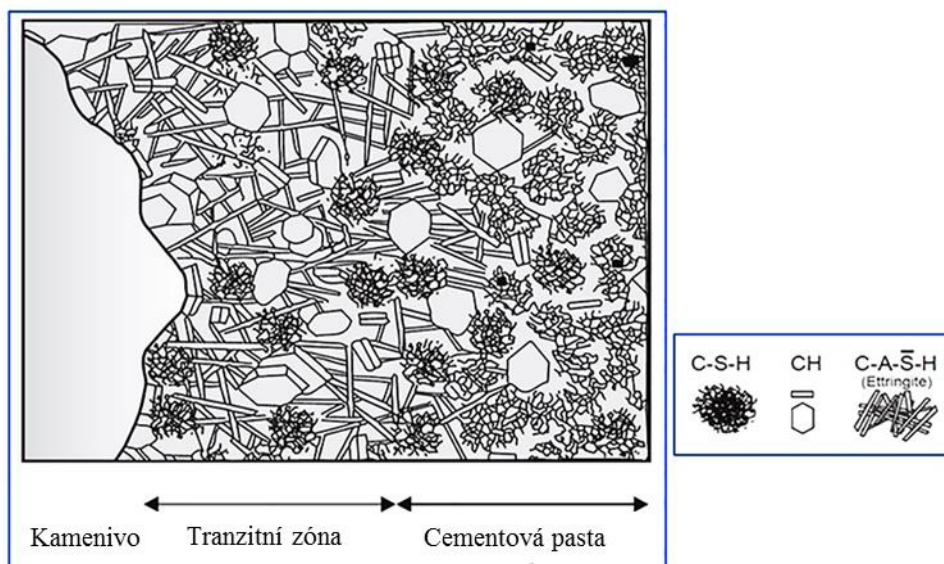
Po chemické stránce jsou běžně používaná kameniva obvykle horniny s vysokým podílem křemene a živce (zejména u těžných a kopaných kameniv), případně vápence a dolomitu (zejména u drcených kameniv) [9]. Obvyklý je také podíl jílových minerálů. Mezi nežádoucí složky patří např. slída, která má nízkou pevnost a zvyšuje spotřebu záměsové vody, a minerály s kluznými plochami [35].

2.4 Tranzitní zóna

Tranzitní zóna je přechodová oblast na rozhraní mezi pojivem a plnivem. Podrobněji je popsána u materiálů na bázi cementu, jako jsou malty, omítky a beton. Je známo, že tranzitní zóna těchto materiálů významně ovlivňuje jejich výsledné vlastnosti. Například u betonů je mikrostruktura tranzitní zóny charakterizována většími póry a většími krystalickými hydratačními produkty v porovnání s okolní pastou, což způsobuje nehomogenitu ve struktuře a snížení pevnosti betonu [33]. Vznik odlišné mikrostruktury v tranzitní zóně betonu bývá připisován především tzv. lokálnímu stěnovému efektu [33], při kterém u povrchu velkých zrn

¹ Filer je na rozdíl od jiných jemnozrnných částic přidáván s cílem upravit určité vlastnosti materiálu.

dochází k akumulaci určité části záměsové vody. Důsledkem toho bezprostředně u povrchu velkých zrn kameniva, tedy v jejich tranzitní zóně, má cementová pasta vyšší vodní součinitel než pasta dál od zrna [33], a proto i jinou strukturu. Pro lepší představu o struktuře tranzitní zóny v betonu je uveden Obr. 5.



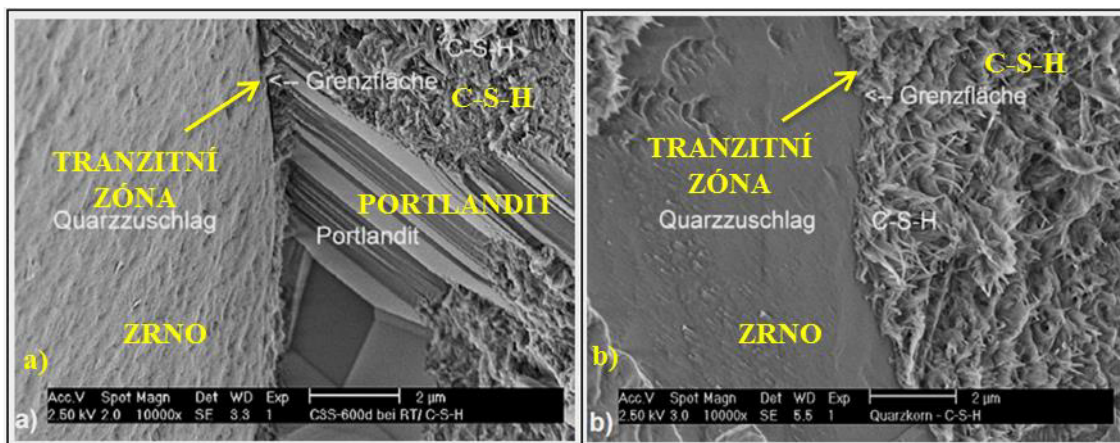
Obr. 5: Mikrostruktura tranzitní zóny v betonu, převzato z [36]

V tranzitní zóně dochází také ke vzniku prvních mikrotrhlin. U běžných betonů (s vodním součinitelem 0,5 až 0,7) se tyto mikrotrhliny začínají vyvíjet vlivem smršťování dokonce už před zatížením. Tím dochází ke snížení účinnosti přenosu napětí mezi cementovou pastou a kamenivem, jinými slovy ke snížení spolupůsobení mezi cementovou pastou a kamenivem. Tento negativní účinek smršťování během hydratace je u sádry teoreticky vyloučen, protože sádra se smršťuje¹ jen po smíchání s vodou, kdy je v plastickém stavu, pak její objem narůstá asi o 0,1 – 1 % [6]. Nicméně ke vzniku mikrotrhlin v tranzitní zóně sádrového kompozitu může dojít vlivem rozdílné teplotní roztažnosti pojiva a plniva při teplotních změnách.

V běžném betonu má tranzitní zóna tloušťku 0,05 – 0,1 mm [33]. Ke snížení tloušťky tranzitní zóny a k jejímu zpevnění dochází při snížení vodního součinitele (např. pomocí plastifikátorů) a při použití aktivních příměsí (např. křemičitých úletů) nebo ultrajemného fileru [33, 34]. Ke zvýšení pevnosti tranzitní zóny mezi některými druhy kameniv a betonem může dojít i vlivem vytvoření chemické vazby v pozdějších stádiích hydratace. Pokud je v tranzitní zóně více nezhydratovaných cementových zrn, je pozorováno snížení pórovitosti tranzitní zóny v čase [37].

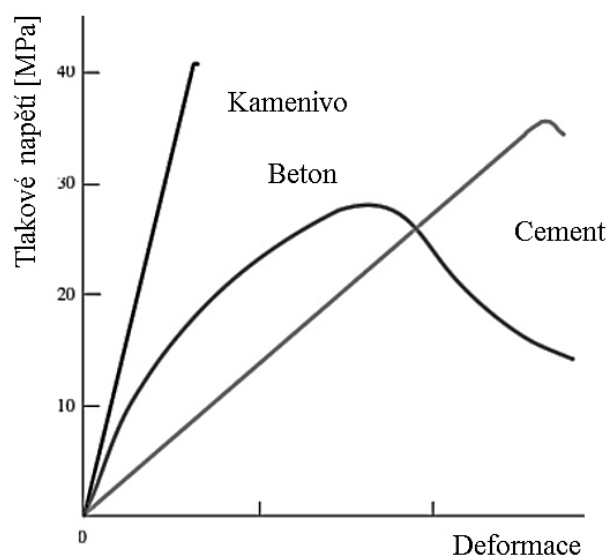
¹ Smršťováním je myšlen úbytek objemu, tj. je uvažováno jen kladné smršťování.

Jako názorná ukázka vlivu vodního součinitele na velikost tranzitní zóny na rozhraní mezi plnivem a cementovou pastou je uveden Obr. 6 [38]. Vzorky s vyšším vodním součinitelem mají mnohem širší a pórovitější tranzitní zónu [39].



Obr. 6: Tranzitní zóna v betonu s vysokým (a) a nízkým vodním součinitelem (b) [38]

Některé výzkumy poukazují také na závislost mezi velikostí zrn a tranzitní zónou. S rostoucí velikostí kameniva obvykle roste pórovitost [37] a tloušťka [40] tranzitní zóny. U vzorků s pórovitější tranzitní zónou pak dochází kromě snížení pevnosti také ke snížení trvanlivosti (zejména u vyztuženého betonu) [41] a modulu elasticity [39, 41]. Modul elasticity výsledného kompozitu může být nižší než modul elasticity jednotlivých složek, což je připisováno právě tranzitní zóně [41]. Stejně tak i tvar pracovního diagramu (Obr. 7) bývá připisován tranzitní zóně – ačkoliv jednotlivé složky kompozitu vykazují značnou elasticitu, kompozit se elasticky nechová vůbec (nebo jen při malé zátěži) [41].



Obr. 7: Tvar pracovního diagramu betonu, kameniva a cementu, převzato z [41]

Podle již provedených výzkumů hraje při tvorbě tranzitní zóny roli také vlhkost kameniva [42]. Při použití vysušeného kameniva vzniká méně pórovitá tranzitní zóna než při použití vodou nasyceného kameniva, protože vysušené kamenivo absorbuje volnou vodu z cementové kaše v tranzitní zóně a snižuje tak vodní součinitel. Vodou nasycené kamenivo způsobuje nejprve vytvoření pórovitější struktury, avšak umožňuje postupné zvyšování stupně hydratace v delším časovém horizontu a s tím spojené snižování pórovitosti tranzitní zóny.

Poněkud netradiční způsob zvýšení pevnosti tranzitní zóny cementového kompozitu (se skelným prachem) je popsán [43]. Působení mikrovlnných vln na zkoumané vzorky došlo k urychlení hydratace cementu a k vytvoření pevnější struktury.

Z výše zmíněných důvodů lze předpokládat, že také tranzitní zóna u sádrových materiálů má značný vliv na jejich výsledné chování.

2.5 Průzkum tranzitní zóny pomocí elektronové mikroskopie

Aby bylo možné co nejlépe prozkoumat tranzitní zóny navržených směsí na rozhraní mezi pojivem a drobným kamenivem, a zjistit spojitosti mezi strukturou tranzitní zóny a vlastnostmi navržených směsí, je potřeba zvolit vhodnou metodu pozorování. Vzhledem k tomu, že o výsledném chování materiálu mnoho vypovídá jeho mikrostruktura, je vhodné zaměřit se právě na ni. Krystaly sádry mají velikost řádově v jednotkách mikrometrů, což je důvodem, proč světelný mikroskop vzhledem k jeho nedostatečnému zvětšení (maximálně cca tisíckrát [44]) není vhodný. Rozlišovací mez světelných mikroskopů, tj. taková vzdálenost dvou bodů, při které je lidské oko ještě rozliší, je omezena difrakčním limitem, který tvoří přibližně polovina vlnové délky použitého světla [45]. Kromě toho má světelný mikroskop malou hloubku ostrosti (rozdíl vzdáleností nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu, které se ještě lidskému oku jeví jako ostré). Vhodnější variantou se jeví využití elektronového mikroskopu.

2.5.1 Princip elektronového mikroskopu

Elektronové mikroskopy lze rozdělit do dvou skupin – transmisní elektronové mikroskopy (TEM) a skenovací elektronové mikroskopy (SEM, označované také jako rastrovací či řádkovací). Hlavní rozdíl mezi TEM a SEM spočívá v tom, že u TEM jsou detekovány elektrony procházející vzorkem a u SEM je měřen účinek elektronů dopadajících na vzorek [45]. Díky tomu SEM umožňují trojrozměrný pohled do mikrosvěta a preparáty pro SEM nemusí mít formu ultratenkých řezů.

Klíčový poznatek pro vznik elektronových mikroskopů učinil v roce 1925 Luis de Broglie, který objevil, že elektron má nejen částicový, ale i vlnový charakter [45]. Svazek elektronů lze proto používat v elektronových mikroskopech místo světelného paprsku. Elektronový svazek má vlnovou délku asi sto tisíckrát kratší, než má viditelné světlo (asi 400 – 700 nm) [45]. Přesněji je vlnová délka svazku elektronů v konkrétním mikroskopu určována v závislosti na urychlovacím napětí. Vyšší urychlovací napětí přispívá ke kratší vlnové délce a tím ke snížení (tedy zlepšení) rozlišovací meze. Příliš vysoké napětí však vyžaduje obrovské rozměry mikroskopu, respektive tubusu, a navíc může způsobit radiační poškození vzorku. Podle vlnové délky svazku elektronů teoreticky vychází rozlišovací mez elektronových mikroskopů až o 5 řádů lepší, než u světelného mikroskopu. Prakticky je toto rozlišení jen asi o 2 až 3 řády lepší vlivem vad zobrazení.

Pro lepší pochopení principu, na kterém fungují elektronové mikroskopy, je nutné vysvětlit i funkci základních součástí mikroskopu. První takovou součástí jsou elektronové trysky, které slouží jako zdroj elektronů. Aby se elektrony uvolnily, je potřeba dodat větší energii, než je vazebná energie elektronů. Toho bývá dosaženo zvýšenou teplotou, působením elektrostatického pole, nebo kombinací obou. Uvolněné elektrony se dále pohybují tzv. tubusem mikroskopu rychlostí blízkou rychlosti světla. V prostoru tubusu je udržováno vakuum (přesněji podtlak blízký vakuu) tak, aby bylo zabráněno srážkám elektronů s molekulami ve vzduchu a s tím spojenému snížení energie elektronů a k vychýlení elektronů ze směru. Vakuum současně zabraňuje vzniku elektrického výboje mezi katodou a anodou trysky a také chrání zkoumaný vzorek před kontaminací.

Elektron rychle letící „vakuum“ je dále potřeba usměrnit. K ovlivnění trajektorie elektronů bývá nejčastěji využíváno elektromagnetické pole vyvolané magnetickými čočkami, což jsou cívky s měděnými závitmi. Právě v oblasti čoček vznikají některé zobrazovací vady, které je však možné částečně eliminovat. Například elektrony, které jsou vychýleny magnetickou čočkou nesprávně, mohou být odstíněny pomocí clon. Nejvýkonnější čočkou mikroskopu je objektiv [46], který je nejbližší pozorovanému předmětu.

V dalších krocích se liší SEM a TEM. V TEM elektrony převážně prochází preparátem, který musí být ve formě velmi tenkých řezů (max 100 nm), dále systémem čoček a stínítek, kde dojde ke zvětšení obrazu, a nakonec dopadají na stínítko pokryté nejčastěji ZnS, které dopadající energii elektronů převádí na světlo [46]. Je třeba dodat, že preparáty pro TEM navíc nesmí obsahovat vodu, a že musí být zajištěn kontrast mezi preparátem a zalévacím médiem (je – li preparát zalit např. v pryskyřici).

V SEM se elektrony dostávají pod povrch preparátu, kde se pohybují chaoticky. Dochází k pružným i nepružným srážkám a vzniku dalších doprovodných jevů. Příkladem takových jevů je vznik sekundárních elektronů (vyražených z atomového obalu) nebo Augerových elektronů (uvolněných z atomového obalu poté, co převzaly energii jiného elektronu po jeho přechodu do vrstvy s nižší energií) a rentgenové záření. Přibližně lze určit, v jaké hloubce pod povrchem vznikají jednotlivé druhy doprovodných jevů a jaký mají rozsah. Každý doprovodný jev, případně jejich kombinaci, lze detekovat a využít pro měření specifických vlastností vzorku, např. pro zjištění prvkového složení [45]. K zobrazení povrchu preparátu v SEM je využíváno sekundárních elektronů, které vystupují z povrchu preparátu, nebo odražených elektronů. Tyto elektrony jsou zachyceny pomocí detektorů a využity pro vytvoření obrazu. Podobně jako u TEM, i u SEM jsou kladeny určité požadavky na preparát, např. odstranění vody a zajištění vodivosti povrchu.

2.5.2 Určení prvkového složení pomocí elektronové mikroskopie

Pomocí skenovacího i transmisního elektronového mikroskopu je možné určit kvalitativní i kvantitativní prvkové složení preparátu [45]. Podmínkou je, aby součástí mikroskopu byl detektor rentgenového záření, který provádí rozklad rentgenového záření vycházejícího ze vzorku podle energie (energy dispersive spectrometer – EDS) nebo podle vlnové délky (wavelength dispersive spectrometer – WDS). Častěji používanou metodou je EDS, která je méně přesná, ale umožňuje rychlejší získání spektra a náklady na pořízení potřebného vybavení jsou nižší.

Princip EDS je následující [47]. Urychlený svazek elektronů dopadá na povrch preparátu a interaguje s atomy. V případě, že dojde k vyrazení některého elektronu z vnitřních slupek atomu, nastává tzv. excitovaný stav. Následně dochází k přeskoku jiného elektronu ze slupky o vyšší energii na místo vyraženého elektronu (tzv. deexcitace) za současného vyzáření kvanta elektromagnetického záření. Pro EDS je využívána oblast vyzářeného rentgenového záření (řádově desítky keV), z jejíž intenzity je možné určit prvkové složení.

3 Experimentální část

3.1 Cíl práce

Cílem experimentální části této práce je návrh sádrové kaše a sádrových malt s různými druhy drobného kameniva a následné zjištění a porovnání jejich vlastností. Dalším cílem je popsání účinku různých druhů písků na vlastnosti sádrové malty a na změny ve struktuře sádrové malty. Při návrhu směsí je kladen důraz na vhodné dávkování jednotlivých složek směsí, především drobného kameniva, s ohledem na porovnatelnost jednotlivých materiálů.

3.2 Měřené veličiny a metody měření

Vlastnosti navržených sádrových maltových směsí byly zjišťovány tradičními metodami i metodami založenými na použití nejmodernějších přístrojů. Konkrétním zjišťovaným veličinám a postupům při jejich měření jsou věnovány následující podkapitoly.

3.2.1 Zjišťování objemové hmotnosti drobného kameniva

Objemová hmotnost je definována jako hmotnost jednotkového objemu materiálu, přičemž do objemu materiálu jsou zahrnovány i póry a dutiny. U materiálu bez póru a dutin je objemová hmotnost totožná s hustotou ρ [kg/m³].

Objemová hmotnost ρ_v [kg/m³] kameniva byla zjištěna pomocí odměrného válce s vodou, do kterého bylo vsypáno vysušené kamenivo o známé hmotnosti m [kg]. Z rozdílu hladin před a po vsypání byl zjištěn objem kameniva V [m³]. Použitá kameniva byla považována za nenasákavá. Objemová hmotnost ρ_v [kg/m³] byla dopočítána podle rovnice (6):

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (6)$$

3.2.2 Analýza distribuce jemných částic

Distribuce jemných částic (do 0,063 mm) drobného kameniva P3 (sklářský písek) a P5 (říční písek) byla zjištěna pomocí přístroje ANALYSETTE 22 MicroTec plus od firmy FRITSCH, který využívá ohyb laserového paprsku.

3.2.3 Zjištění chemického složení sádry pomocí rentgenové fluorescence

Přesné chemické složení šedé stavební sádry (hemihydrátu) bylo ověřeno rentgenovou fluorescencí (XRF) pomocí sekvenčního vlnově disperzního rentgenfluorescenčního spektrometru Spectroscan MAKC GVII [48]. Tento přístroj pomocí primárního rentgenového záření směřovaného na vzorek vyvolává fluorescenci, tedy sekundární rentgenové záření. Sekundární záření je uvolněno po vyrazení elektronu z vrstev blíže jádru (K, L), kdy uvolněné místo zaplní elektron z vrstvy s vyšší energií [49]. Energie záření udává kvalitativní složení a intenzita záření udává kvantitativní složení [49].

Při experimentu byl vzorek nejprve upraven lisováním do podoby tablety a následně podroben bezkalibrační analýze s vyhodnocením v programu FPM. Množství jednotlivých složek bylo vypočteno metodou fundamentálních parametrů.

3.2.4 Zjištění chemického složení kameniva pomocí XRD

Určení chemického složení drobného kameniva bylo při experimentech provedeno rentgenovou difrakční analýzou (XRD) pomocí přístroje X'PertPRO MPD od výrobce PANalytical. XRD slouží ke stanovení mineralogického složení krystalických látek. Princip této metody spočívá v rozptylu rentgenového záření dopadajícího na krystal. Atomy v krystalu jsou uspořádány pravidelně a díky tomu je rozptýlené záření zesilováno interferencí a vznikají difrakční maxima [50]. Podle jejich polohy, intenzity a tvaru lze určit krystalické složení vzorku.

3.2.5 Průzkum tranzitní zóny

Tranzitní zóna byla u všech navržených směsí s kamenivem zkoumána pomocí skenovacího elektronového mikroskopu MERLIN od firmy ZEISS. Princip elektronového mikroskopu je podrobně popsán v kapitole 2.5. Byly pořízeny fotografie tvarů a povrchů typických zrn kameniva před přidáním do sádrového pojiva a dále fotografie tranzitních zón. Tyto fotografie byly následně porovnány s výsledky získanými z ostatních experimentů.

3.2.6 Hodnota rozlítí

Hodnota rozlítí vyjadřuje konzistenci plastických a tekutých směsí [51] a vypovídá tedy o jejich zpracovatelnosti. Je závislá na vodním součiniteli, na přísadách (např. plastifikátorech), na jemnosti mletí pojiva apod.

Hodnota rozlití byla stanovována podle ČSN EN 13454-2+A1 [51] pomocí kovového kužele umístěného na desce střešacího stolku. Kužel byl rovnoměrně plněn maltou ve dvou vrstvách. Každá vrstva byla rozprostírána pomocí dusadla. Po sejmutí přebytečné malty a odstranění nástavce byl kovový kužel zvednut kolmo vzhůru. Po 15 rázech s frekvencí 1 ráz za 1 s byl změřen průměr koláče ve dvou na sebe kolmých směrech. Průměrná hodnota s přesností na 1 mm byla zaznamenána jako výsledná hodnota rozlití.

Pro pojiva ze síranu vápenatého, pro kompozitní pojiva ze síranu vápenatého a pro tuhé průmyslově vyráběné maltové směsi má být podle ČSN EN 13454-2+A1 [51] hodnota rozlití (150 ± 5) mm.

3.2.7 Počátek a konec tuhnutí

Počátek tuhnutí udává dobu zpracovatelnosti směsi. Kašovitá (případně tekutá) směs ve fázi tuhnutí ztrácí svoji původní zpracovatelnost a postupně nabývá charakteru pevné látky.

Počátek a konec tuhnutí byl měřen podle normy ČSN EN 13279-2 [52] stejným způsobem jako pro cement pomocí Vicatova přístroje. Vicatův přístroj byl nastaven do nulové polohy a jehla byla zvednuta do horní polohy. Vicatův prstenec byl naplněn zamíchanou sádrovou směsí a přebytek hmoty byl seříznut nožem. Vicatův prstenec byl poté umístěn pod jehlu Vicatova přístroje a jehla byla nastavena těsně nad povrch sádry. Po uvolnění pohyblivé části a vniknutí jehly do sádry byla odečtena vzdálenost mezi koncem jehly a podložní destičkou. Spouštění jehly bylo opakováno v minutovém intervalu. Časový interval mezi vsypáním sádrové směsi do vody a okamžikem, kdy vzdálenost mezi jehlou a podložní destičkou byla (6 ± 3) mm, byl zaznamenán jako počátek tuhnutí. Za konec tuhnutí byl považován okamžik, ve kterém jehla poprvé vnikla jen do hloubky 0,5 mm.

3.2.8 Zjišťování objemové hmotnosti zkušebních těles

Objemová hmotnost zkušebních těles byla v laboratořích zjištěna gravimetrickou metodou podle rovnice (6) na vysušených trámečcích. Rozměry trámečků byly změřeny digitálním posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm a hmotnost byla zjištěna pomocí digitálních laboratorních vah Ohaus SP6000 Scout Pro s přesností na 1 g. Výsledná objemová hmotnost byla určena jako průměr objemových hmotností tří trámečků.

3.2.9 Hustota, pórovitost a distribuce velikostí pórů

Pórovitost pevných materiálů je definována jako poměr objemu pórů v materiálu k celkovému objemu tohoto materiálu a může být vyjádřena v objemových procentech nebo bezrozměrným číslem. Jedná se o důležitou fyzikální vlastnost, která ovlivňuje transport tepla a vlhkosti v materiálu i jeho mechanické, fyzikální, akustické aj. vlastnosti. Důležitou roli hraje nejen celková pórovitost, ale také velikost, tvar a otevřenost resp. uzavřenost pórů. Procentuální zastoupení jednotlivých velikostí pórů lze vyjádřit pomocí distribuční křivky.

Experimentálně byla distribuční křivka a hustota zkoumaných směsí zjištěna rtuťovou porozimetrií pomocí porozimetru Pascal 140 – 440 od výrobce Thermo Electron. Přístroj vhání do materiálu rtuť pod tlakem, který je úměrný velikosti pórů. Podle tlaku a objemu vhaněné rtuti lze určit objemové zastoupení pórů o průměrech 0,003 μm až 100 μm . Celková pórovitost ψ [-] byla dopočítána ze známé hustoty ρ [kg/m^3] a objemové hmotnosti ρ_V [kg/m^3] podle vztahu (7):

$$\psi = V_p/V = (V - V_h)/V = 1 - V_h/V = 1 - h = (1 - \rho/\rho_V) \quad (7)$$

kde V_p [m^3] je objem pórů, V_h [m^3] objem pevné fáze, V [m^3] celkový objem materiálu a h [-] hutnost materiálu [53].

Objemové zastoupení pórů o průměru nad 100 μm bylo dopočteno z celkové pórovitosti ψ [-] a objemu pórů do 100 μm zjištěných rtuťovou porozimetrií.

3.2.10 Přídržnost

Přídržnost je definována jako maximální napětí v tahu vyvozené zatížením působícím kolmo k povrchu malty nanesené na podklad. Přídržnost byla u zkoumaných směsí stanovena podle normy ČSN EN 1015-12 [54]. Malty byly nanесeny na pórobetonový podklad a ještě v plastickém stavu do nich byly vykrouženy kruhy o průměru 5 cm. Po sedmi dnech bylo na vnitřní části kruhů pomocí speciálního přístroje (COMING plus a.s.) vyvozeno tahové napětí prostřednictvím kovových odtrhových terčů s plochou ve tvaru kruhu o průměru 5 cm, přilepených na povrch malty (viz Obr. 8).



Obr. 8: Zjišťování přídržnosti

Přídržnost f_u [N/mm^2] byla vyjádřena jako podíl vyvozeného zatížení F_u [N] a zkoušené plochy A [mm^2] podle rovnice (8):

$$f_u = F_u / A \quad (8)$$

Pro každou směs bylo zaznamenáno pět hodnot přídržnosti, které byly následně vyhodnoceny pomocí DD testu (viz 3.2.19). Kromě hodnot přídržnosti byl u každého měření zaznamenán i způsob odtržení. Podle normy ČSN EN 1015-12 [54] mohou nastat tři způsoby porušení:

- a) Porušení přilnavosti, tj. mezi maltou a podkladem. Výsledkem zkoušky je hodnota přídržnosti.
- b) Porušení soudržnosti ve vrstvě malty. Výsledek zkoušky je menší než skutečná přídržnost.
- c) Porušení soudržnosti v podkladovém materiálu. Výsledek zkoušky je menší než skutečná přídržnost.

V případech, kdy došlo k porušení a), lze výslednou hodnotu považovat za průměrnou přídržnost. Při porušení b) a c) je výsledná hodnota považována za výrobcem deklarovanou minimální hodnotu přídržnosti. V případě, že by došlo k odtržení ve vrstvě lepidla mezi kruhovým terčem a maltou, je měření neplatné. Při experimentech došlo u některých měření

ke kombinaci způsobů porušení a), b) a c), proto bylo u každého měření zaznamenáno, z kolika procent plochy došlo k jednotlivým způsobům porušení.

3.2.11 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu R_f [MPa] je mezní napětí, při kterém dochází k porušení trámečku v místě namáhání ohybovým momentem. Ohybový moment je v případě tříbodové zkoušky vyvozován osamělou silou působící svisle na střed trámečku, který je prostě podepřen na krajích. Maximální moment tak vzniká uprostřed délky trámečku. První trhлина se objevuje v tažené části průřezu, tedy u spodního povrchu. Kdyby k porušení došlo nejprve drcením tlačené části průřezu, jednalo by se o pevnost v tlaku za ohybu.

Při experimentech byla pevnost v tahu za ohybu zjišťována standardní tříbodovou zkouškou pomocí počítačově ovládaného mechanického lisu FP 100 od výrobce VEB Industriewerk Ravenstein, do kterého byl připevněn speciální nástavec určený k měření pevnosti za ohybu. Zkušebními tělesy byly trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm podle normy ČSN EN 13454-2 [51]. Trámeček byl uložen jednou z bočních ploch na válcové podpory vzdálené od sebe 100 mm tak, aby byl uložen kolmo na směr hutnění, tedy pootočen o 90° oproti pozici ve formě. Uprostřed rozpětí byl trámeček zatěžován pomocí zatěžovacího válce silou, která byla zvyšována rovnoměrnou rychlostí (50 + 10) N/s až do zlomení trámečku. Pevnost v tahu za ohybu pak byla určena ze vztahu (9):

$$R_f = (1,5 \times F_f \times l) / b^3 \quad (9)$$

kde b [mm] je délka boční strany průřezu trámečku, F_f [N] je maximální síla působící na střed trámečku a l [mm] je vzdálenost válcových podpor. Pevnost v tahu za ohybu každé směsi byla vyhodnocena pomocí DD testu (viz 3.2.19). Výsledná hodnota byla stanovena jako průměr pevností v tahu za ohybu z hodnot, které nebyly vyřazeny testem.

3.2.12 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je definována jako mezní napětí, při kterém dochází k porušení zkušební vzorku. Lze ho vyjádřit rovnicí (10):

$$R_c = F_c / A \quad (10)$$

kde R_c [MPa] je pevnost v tlaku, F_c [N] je nejvyšší lomové zatížení při porušení a A [mm²] je tlačena plocha.

Zkoušení pevnosti v tlaku bylo prováděno podle normy ČSN EN 13454-2 [51] na polovinách trámečků zbylých po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Polovina trámečku byla položena na boční plochu, tj. kolmo na směr hutnění, do speciálního zkušebního nástavce určeného k měření pevnosti v tlaku a umístěného do mechanického lisu FP 100 od výrobce VEB Industriewerk Ravenstein. Poté byla polovina trámečku zatěžována rychlostí $(2\,400 + 200)$ N/s do porušení. Pevnost v tlaku poloviny trámečku pak byla stanovena podle rovnice (10). Pevnost každé směsi byla zjišťována na šesti polovinách trámečku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny pomocí DD testu (viz 3.2.19) a výsledná pevnost každé směsi pak byla určena jako průměr z hodnot, které v testu nebyly vyřazeny.

3.2.13 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo z teplejší části do chladnější. Pro konkrétní materiál je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ [W/(m·K)], což je tepelný výkon procházející plochou 1 m² do vzdálenosti 1 m při jednotkovém teplotním gradientu 1 K [53]. Součinitel tepelné vodivosti není konstantní, protože závisí na teplotě a vlhkosti materiálu.

Při experimentech byl součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] zjišťován nestacionární metodou pomocí přístroje Isomet 2114 od výrobce Applied Precision. Tento přístroj vysílá impulzy tepelného toku do materiálu a měří jeho teplotní odezvy.

3.2.14 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita je teplo potřebné k ohřátí materiálu o 1 K. Lze ji vztáhnout na 1 m³ materiálu, pak je nazývána objemová tepelná kapacita c_v [J/(m³·K)], nebo na 1 kg materiálu, pak se jedná o měrnou tepelnou kapacitu c [J/(kg·K)]. Měrnou tepelnou kapacitu vyjadřuje vztah (11):

$$c = 1/m \cdot (dQ/dT) \quad (11)$$

kde m [kg] je hmotnost materiálu, Q [J] je množství tepla a T [K] je teplota. Určitá část tepla je spotřebována i na změnu objemu materiálu, proto je v případě požadavku na vysokou

přesnost potřeba udávat, jestli předávání tepla probíhá za konstantního tlaku nebo za konstantního objemu. U stavebních materiálů je teplo využité na změnu objemu zanedbáváno.

Při experimentech byla objemová tepelná kapacita c_v [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$] zjišťována nestacionární metodou pomocí přístroje Isomet 2114 od výrobce Applied Precision, tedy stejným způsobem jako součinitel tepelné vodivosti.

3.2.15 Difúze vodní páry

Difúzní vlastnosti zkoumaných směsí byly stanoveny miskovou metodou. Princip této metody spočívá v měření hmotnostních změn způsobených navlháním a vysycháním materiálu v závislosti na rozdílných parciálních tlacích na spodní a horní straně materiálu. Aby bylo zabráněno transportu vlhkosti ve vodorovném směru, byla boční strana všech vzorků natřena vrstvou epoxidu. Dále se postupovalo ve dvou fázích, které se od sebe lišily okrajovými podmínkami. Důvodem, proč je měření obvykle prováděno ve dvou fázích, jsou tepelně technické normy ČSN 730540-3 a ČSN 730540-4, které byly zavedeny v roce 2005, a které difúzní vlastnosti materiálu nově rozdělily na tzv. suché veličiny, které se značí dolním indexem „d“ (dry), a mokré veličiny, které se značí dolním indexem „w“ [55]. Např. mokrá faktor difúzního odporu se značí μ_w a suchý faktor difúzního odporu se značí μ_d .

V první fázi, tzv. dry cup, byl na dno speciální hliníkové misky nasypán silikagel. Nad silikagel byl umístěn vzorek tvaru válce o průměru 120 mm a výšce 30 mm a mezera mezi bokem vzorku a stěnou misky byla utěsněna technickou plastelínou. Pod vzorkem tak vzniklo prostředí s téměř nulovou vlhkostí. Vzorek byl zvážen pomocí digitálních laboratorních vah s přesností na tisícinu gramu a umístěn do termostatické skříně s průměrnou relativní vlhkostí 50 % a teplotou 25 °C. Vážení bylo opakováno několikrát denně po dobu několika dní, přičemž hmotnost vzorku rostla. Hmotnostní změny byly zaznamenány do grafu. Pro vyhodnocení byly dále uvažovány jen hodnoty z oblasti, kde křivka v grafu dosahovala přímkového charakteru s hodnotou spolehlivosti $R \doteq 1$.

Ve druhé fázi, tzv. wet cup, byl silikagel nahrazen vodou, a hmotnost vzorku v čase klesala. Hodnoty pro vyhodnocení byly opět vybrány na základě grafu.

Z takto vybraných hodnot byl v obou fázích součinitel difúzní vodivosti δ [s] vypočítán podle rovnice (12):

$$\delta = (\Delta m \cdot d) / (A \cdot t \cdot \Delta p_p) \quad (12)$$

kde Δm [kg] je množství páry prošlé vzorkem, d [m] je výška válcového vzorku, A [m²] je plocha vzorku v kontaktu s vodní párou, t [s] je časový rozdíl mezi prvním a posledním uvažovaným vážením a Δp_p [Pa] je rozdíl parciálních tlaků v nádobě pod vzorkem a v prostředí nad vzorkem. Součinitel difúze pro vodní páru D [m²/s] a faktor difúzního odporu μ [-] byly poté dopočítány podle vztahů (13) a (14):

$$D = (\delta \cdot R \cdot T) / M \quad (13)$$

$$\mu = D_{vzduch} / D = 1 / (N \cdot \delta) \quad (14)$$

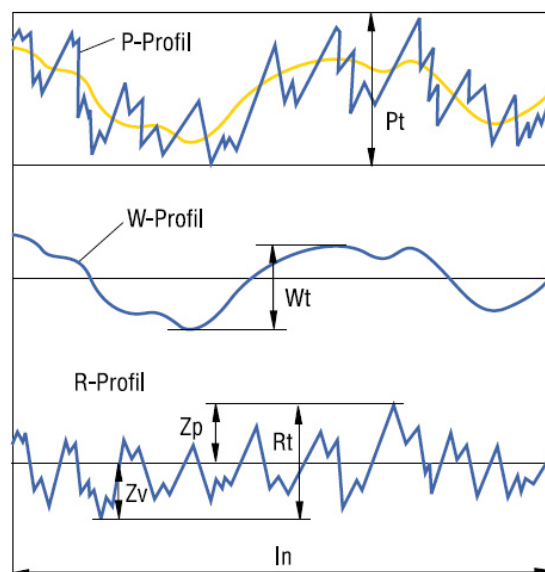
kde R [J/(mol·K)] je univerzální plynová konstanta, T [K] je teplota, M [kg/mol] je molární hmotnost vody, D_{vzduch} [m²/s] je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu a $N \sim 5,45 \times 10^9$ [s] je přibližná hodnota difúzního odporu vzduchu [53]. Výsledné hodnoty veličin pro každou z vybraných směsí byly určeny jako průměr ze tří hodnot.

3.2.16 Dynamické měření sorpce

Pro určení schopnosti materiálu absorbovat vodní páru se nejčastěji používá statická gravimetrická metoda s použitím exsikátorů, ve kterých je požadované vlhkosti docíleno pomocí saturovaných roztoků solí [56]. Tato metoda je však časově náročná a vyžaduje ruční vážení vzorků, proto byla při experimentech využita alternativní dynamická metoda (dynamic vapor sorption, DVS). Jedná se také o gravimetrickou metodu, při které je vysušený vzorek umístěn na speciální váhy uvnitř klimatické komory, ve které je měněna relativní vlhkost. Měření probíhalo pomocí plně automatizovaného dynamického sorpčního zařízení DVS Advantage (Surface Measurement Systems Ltd.), ve kterém lze docílit relativní vlhkosti 0 až 98 % (s přesností $\pm 1,5$) [57] a teploty 5 až 60 °C (s přesností $\pm 0,2$) [58]. Změn relativní vlhkosti je docíleno mísením suchého a vodou plně nasyceného vzduchu [56] za současného měření aktuální vlhkosti pomocí optického senzoru koncentrace par [57]. Při experimentu byl přístroj nastaven na teplotu 25 °C, na změnu relativní hmotnosti z každé hodnoty po 400 minutách (není-li dříve splněna podmínka změny hmotnosti v čase $dm/dt = 0,00004$ %/min) a na hodnoty relativní vlhkosti [%]: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 a 98 (při sorpci vzestupně, při desorpci sestupně). Výsledkem měření je sorpční isoterma, tedy graf závislosti změn hmotnosti na relativní vlhkosti za konstantní teploty a tlaku [56]. Podle tvaru průběhu je možné rozlišit šest typů sorpčních izoterm [59], přičemž u stavebních materiálů převažuje izoterma typu II, která má esovitý tvar [60].

3.2.17 Analýza drsnosti na lomové ploše

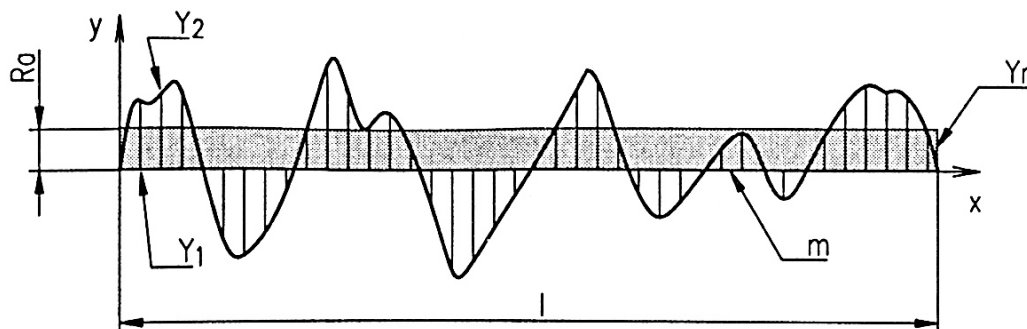
Drsnost lze zjednodušeně definovat jako soubor nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností. Jsou-li nerovnosti ve větší vzdálenosti, jedná se o vlnitost. Dříve byla drsnost hodnocena subjektivně (hmatem a vizuálně) přirovnáním k jednomu z porovnávacích povrchů [61]. Dnes je používáno objektivnější hodnocení, jehož základem je dvourozměrné vykreslení profilu nerovností, který je získáván dotykovou metodou pomocí snímacího hrotu. Profil nerovností může být získán i pomocí laserového skenovacího mikroskopu (CLSM). V tom případě je obtížné přesně dodržovat požadavky stanovené ISO, proto se výpočet parametrů provádí specifickým způsobem [62]. Vyhodnocovaná oblast a referenční délka závisí na zorném poli obrazu. Za mezní vlnovou délku je volena 1/3 až 1/50 šířky zorného pole obrazu. Mezní vlnová délka udává hranici, do které jsou ještě nerovnosti považovány za důsledek drsnosti. Nad touto hranicí jsou nerovnosti přisouzeny vlnitosti, která je při vyhodnocování drsnosti odfiltrována. Podle DIN EN ISO 11562 [63] je primární nefiltrovaný profil značen jako P-profil, profil drsnosti jako R-profil a profil vlnitosti jako W-profil (viz Obr. 9). Obdobně se i veličiny definované na těchto profilech značí P, R nebo W.



Obr. 9: Primární nefiltrovaný profil P a profily vlnitosti W a drsnosti R, převzato z [63]

Z profilu nerovností jsou odvozovány parametry vyjadřující míru drsnosti. Jedním z nejpoužívanějších parametrů je střední aritmetická drsnost R_a [μm] (v některých normách, např. ČSN EN ISO 4287 [64], nazývaná střední aritmetická úchylka profilu). Je definována jako aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky [63].

Geometricky ji vyjadřuje Obr. 10, kde Ra je šířka obdélníku, který má referenční délku l a stejnou plochu, jako je plocha ohraničená čarou drsnosti a středovou čarou. Poloha středové čáry je stanovena na základě lineárního nebo polynomického proložení dat pomocí metody nejmenších čtverců [62]. V grafickém vyjádření pro polohu středové čáry platí, že plocha nad středovou čarou se rovná ploše pod ní.



Obr. 10: Grafické vyjádření střední aritmetické drsnosti Ra [65]

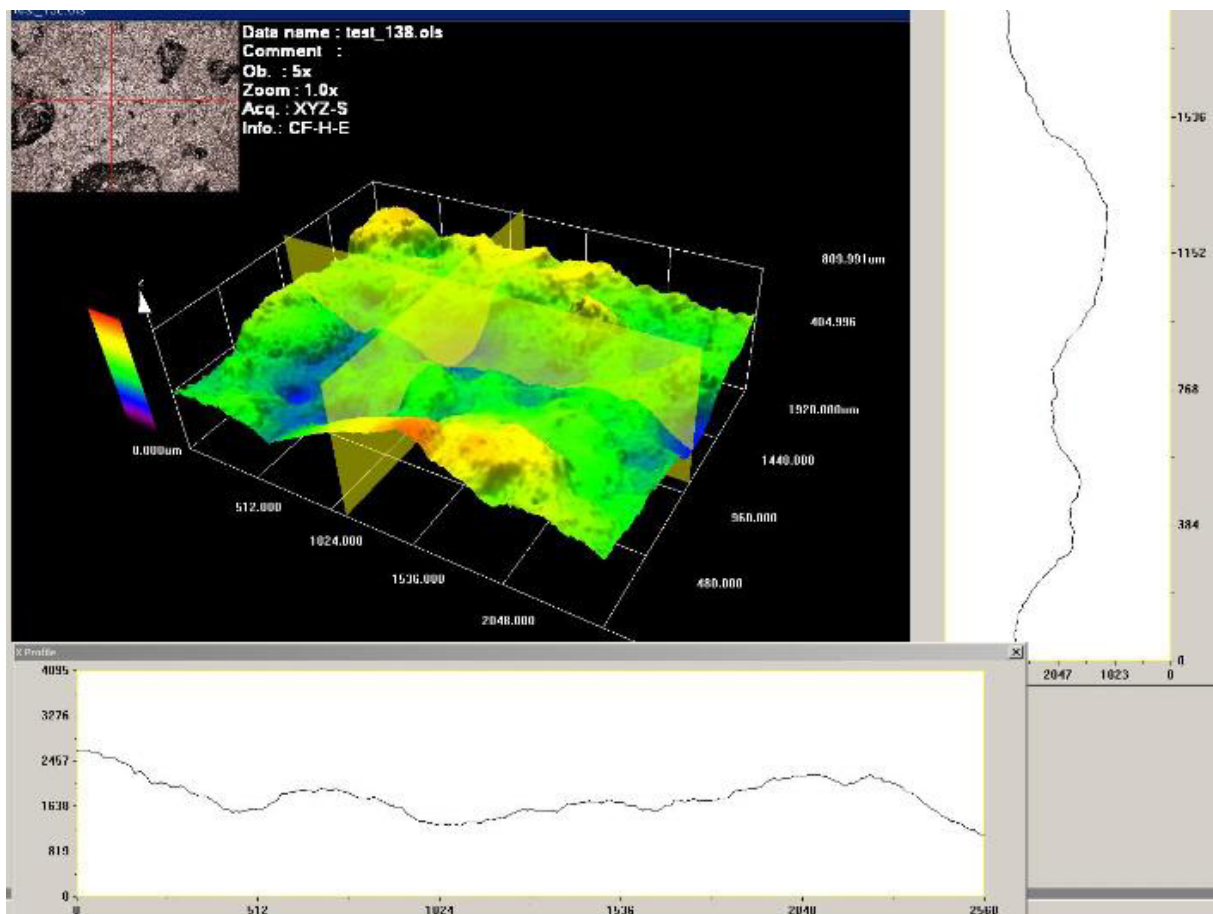
Podobnou veličinou, jako je střední aritmetická drsnost Ra , je aritmetická střední výška drsnosti SRa [μm], s tím rozdílem, že SRa bere v úvahu celou plochu, ne jen jeden směr, a řadí se tedy mezi plošné veličiny. Geometricky je SRa výška kváдру, který má stejný objem, jako těleso ohraničené nerovnostmi a střední rovinou. Při vyhodnocení je pro SRa používán vztah [62]:

$$SRa = \frac{1}{LM} \int_0^M \int_0^L |f(x,y)| dx dy \quad (15)$$

kde L je délka obrysové zakřivené plochy ve směru x , M je délka obrysové zakřivené plochy ve směru y a $Y = f(x,y)$ je zakřivená plocha.

V případě této práce je největší pozornost věnována střední aritmetické výšce drsnosti SRa [μm] a profilu nerovností (P-profilu). Tyto parametry byly experimentálně zjišťovány na lomových plochách trámečků po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Drsnost lomových ploch byla analyzována pomocí konfokálního laserového skenovacího mikroskopu, konkrétně typu LEXT OLS3000.

Zpracovávání výsledků pomocí programu LEXT OLS je patrné na Obr. 11, na kterém je vykreslení profilu nerovností ve dvou na sebe kolmých směrech. Při jednom měření program plošně vyhodnotil obdélník o rozměru 2548 x 1915 μm . Těchto obdélníků bylo hodnoceno 15 na jednom trámečku. Průměr naměřených hodnot byl zaznamenán jako výsledek měření. Za mezní vlnovou délku byla zvolena 1/50 šířky zorného pole obrazu (tedy 51 μm).



Obr. 11: Výstup z programu LEXT_OLS: Profil nerovností

3.2.18 Chování při vysokých teplotách

Účinky od zatížení vysokou teplotou byly zjišťovány jen u směsí S1 (bez plniva) a S2 (s normalizovaným pískem). Z obou směsí bylo vyrobeno osm sad trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Vysušené trámečky byly v klimatické komoře zatěžovány teplotami 100, 200, 400, 500, 650, 800 a 1000 °C. Teplota byla zvyšována rychlostí 1 °C za minutu až na požadovanou teplotu, která byla udržována 4 hodiny. Po vychladnutí na laboratorní teplotu byly zjišťovány následující vlastnosti: objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Popis experimentu také v [66].

3.2.19 Vyhodnocení výsledků pomocí Dean - Dixonovo testu

Dean - Dixonův test (zkráceně DDtest, někdy také označovaný jako Q – test) slouží k nalezení a vyloučení hodnoty, která je příliš odlehlá vzhledem k rozložení ostatních hodnot.

Jeho princip spočívá v seřazení naměřených hodnot od největší po nejmenší, ve zjištění rozpětí R mezi největší x_n a nejmenší x_1 naměřenou hodnotou a následném stanovení odlehlosti Q krajních hodnot podle vzorců (16), (17) a (18):

$$R = x_n - x_1 \quad (16)$$

$$Q_1 = (x_2 - x_1)/R \quad (17)$$

$$Q_2 = (x_n - x_{n-1})/R \quad (18)$$

Pokud zjištěná odlehlost Q_1 (Q_2) překročí určitou tabelovanou hodnotu, je vyloučena nejmenší (největší) naměřená hodnota a test je zopakován pro zbylé hodnoty [67].

Při zpracování výsledků jednotlivých směsí byl použit volně šiřitelný program DDtest, který slouží k výpočtu odhadu směrodatné odchylky a k rychlému a pohodlnému provádění Dean-Dixonova testu na souborech o rozsahu 3 až 9 hodnot.

3.3 Materiály pro výrobu směsí

Základní složkou sádrových maltových směsí byla šedá stavební sádra ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). Jako plnivo byly použity čtyři druhy drobného kameniva, které se od sebe lišily svým původem a tvarem částic. S ohledem na zpracovatelnost směsi bylo třeba oddálit počátek doby tuhnutí, proto byl přidáván monohydrát potravinářské kyseliny citronové.

3.3.1 Šedá stavební sádra

Šedá stavební sádra od firmy GYPSTREND s.r.o. byla vyrobena zčásti z přírodního sádrovce těženého v Koberčicích u Opavy a zčásti z titano-sádrovce, který vzniká jako vedlejší produkt při výrobě titanové běloby v podniku Precheza Přerov [68]. Jedná se o běžnou stavební sádro, která podle rozboru obsahuje značný podíl nečistot. Základní vlastnosti této sádry jsou uvedeny v Tab. 4 a v Tab. 5:

Tab. 4: Vlastnosti šedé stavební sádry udávané výrobcem

Zatřídění podle EN 13279-1[7]	Reakce na oheň	Počátek tuhnutí	Konec tuhnutí	Vodní součinitel	Pevnost po 2 hodinách
Sádrové pojivo třída A	A1	$\geq 6\text{min}$	$\leq 30\text{min}$	0,7 – 0,85	2 – 3,5 MPa

Tab. 5: Chemické složení šedé stavební sádry udávané výrobcem

	Jednotky	Množství
$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	[%]	80 – 95
Ztráta žiháním	[%]	4 – 6
SiO_2 + nerozpustný zbytek	[%]	8 – 12
CaSO_4	[%]	0 – 0,5
SO_3	[%]	37 – 44
CaO	[%]	24 – 36
MgO	[%]	0,2 – 1
Seskvioxidy (Al_2O_3 , Fe_2O_3)	[%]	1 – 2,5

Prvkové složení šedé stavební sádry bylo experimentálně zjištěno pomocí rentgenové fluorescence (XRF, viz 3.2.3) a je v Tab. 6. Dále bylo zjištěno mineralogické složení pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD, viz 3.2.4), které je v Tab. 7.

Tab. 6: Oxidové složení šedé stavební sádry zjištěné XRF analýzou

Složení šedé stavební sádry zjištěné metodou XRF [% hmot.]									
SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	MgO	TiO_2	MnO	P_2O_5
6,93	41,81	2,50	0,96	45,50	0,42	0,70	0,30	0,03	0,03

Tab. 7: Mineralogické složení šedé stavební sádry zjištěné metodou XRD

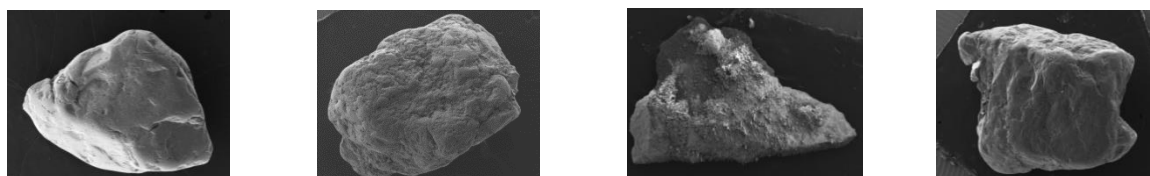
Minerál	bassanit	anhydrit	kalцит	křemen	muskovit
Vzorec	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4	CaCO_3	SiO_2	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$
Množství [% hm.]	85,6	3,6	0,9	3,4	6,5

3.3.2 Kamenivo

Přehled použitého drobného kameniva je uveden v Tab. 8. Číselné značení odpovídá směsi, do které bylo přidáváno. Fotografie kameniva použitého v jednotlivých směsích včetně typických zrn jsou na Obr. 12 a Obr. 13.

Tab. 8: Přehled drobného kameniva

Označení	P2	P3	P4	P5
Původ	povrchově těžené	povrchově těžené	přírodní drcené	přírodní těžené říční
Výrobce	Filtrační písky, spol. s r.o. (Chlum)	Sklopísek Střeleč, a.s.	KÁMEN Zbraslav, a.s.	TAPAS BOREK, s.r.o.
Poznámka	normalizovaný písek (CEN, ČSN EN)	přírodní upravené (obsah $\text{SiO}_2 > 99\%$)	směs hornin	-



Obr. 12: Typická zrna drobného kameniva (zleva: P2, P3, P4, P5) viz také [68]



Obr. 13: Drobné kamenivo (zleva: P2, P3, P4, P5)

Kvalitativní chemické složení bylo zjištěno pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD). Výsledky chemického rozboru jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9: Mineralogické složení kameniva zjištěné metodou XRD

P2 (normaliz.)	Křemen, SiO_2
P3 (sklářský)	Křemen, SiO_2
P4 (drcený)	Křemen, SiO_2 Albit, $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$ Mikroclin, KAlSi_3O_8 Kalcit, CaCO_3 Muskovit, $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Klinochlor, $(\text{Mg}_{2,96}\text{Fe}_{1,55}\text{Fe}_{1,36}\text{Al}_{1,275})(\text{Si}_{2,622}\text{Al}_{1,376}\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
P5 (říční)	Křemen, SiO_2 Albit, $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ Mikroclin, KAlSi_3O_8 Muskovit, $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Před použitím jednotlivých druhů kameniva do směsi byla zjištěna jejich objemová hmotnost (viz 3.2.1) a bylo provedeno sjednocení zrnitostních křivek (viz. 3.5.1).

3.3.3 Kyselina citronová

Do záměsové vody byl pro zpomalení tuhnutí přidáván monohydrát potravinářské kyseliny citronové ($C_6H_8O_7$) o čistotě > 99 % hm. od výrobce Inchema s.r.o.

3.4 Návrh složení sádrových maltových směsí

Složení jednotlivých směsí bylo zvoleno tak, aby byl objem jednotlivých složek v navrhovaných maltových směsích vždy stejný a bylo tedy možné porovnat vliv různých druhů kameniva na vlastnosti sádry [70]. Značení směsí se shoduje s označením použitého kameniva. Výchozí směsí byla směs S2 s normalizovaným pískem. Hmotnostní poměr suchého sádrového pojiva a normalizovaného písku ve směsi byl zvolen 1:2 (tj. 675 g pojiva na 1350 g normalizovaného písku) podle normy ČSN EN 13454-2+A1 [51].

Pro každou směs bylo tedy použito 675 g sádrového pojiva. Hmotnost kameniva ve směsi S2 (s normalizovaným pískem) byla 1350 g, a u směsí S3 – S5 byla přepočítána s ohledem na objemovou hmotnost příslušného kameniva tak, aby kamenivo P3 – P5 bylo dávkováno ve stejném objemu, jako měl normalizovaný písek při požadované hmotnosti 1350 g. Dávkování jednotlivých druhů kameniva a jejich objemové hmotnosti jsou rozepsány v Tab. 10. Kamenivo bylo před dávkováním do směsi vysušeno do ustálené hmotnosti.

Tab. 10: Dávkování kameniva na stejný objem [68]

Označení kameniva	S2	S3	S4	S5
Objemová hmotnost [g/ml]	2,58	2,43	2,63	2,61
Hmotnost na 675 g pojiva [g]	1350	1271	1381	1367

Kromě čtyř maltových směsí (S2 – S5) s různými druhy kameniva byla vyrobena srovnávací sádrová směs bez kameniva (S1). Vodní součinitel směsi S2 (s normalizovaným pískem) a srovnávací směsi S1 byl upraven podle normy ČSN EN 13454-2+A1 [51] na rozliv (150 ± 5) mm. U směsí S3, S4 a S5 byl zachován stejný vodní součinitel jako u směsi S2. Kyselina citronová byla přidávána do záměsové vody jako zpomalovač tuhnutí v množství určeném na základě předchozích zkoušek. Poměr kyseliny citronové a sádry byl zachován u všech směsí stejný. Složení jednotlivých směsí je uvedeno v Tab. 11.

Tab. 11: Složení směsí [68]

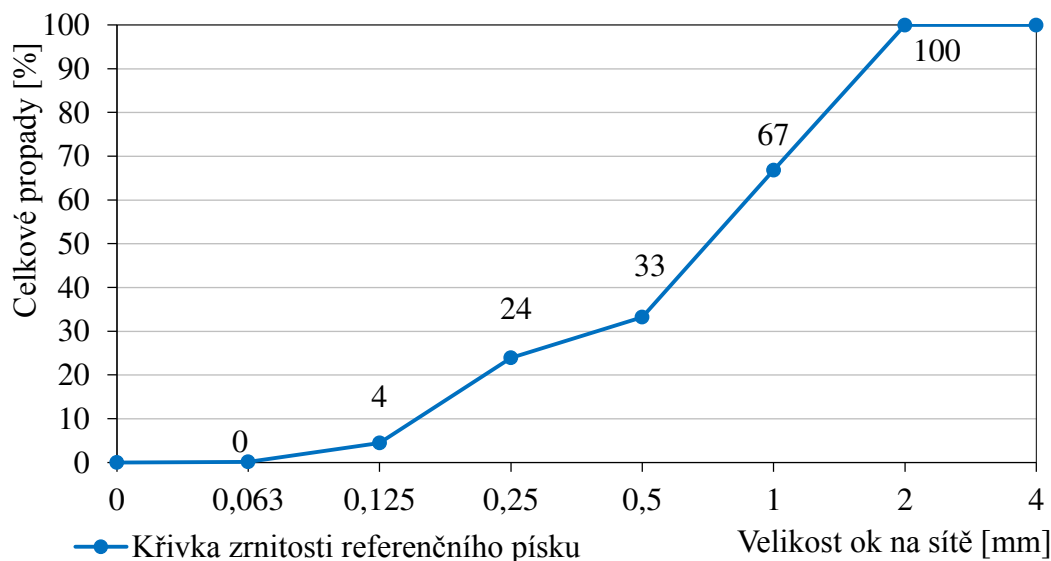
Označení	Sádra [% hm.]	Zpomalovač [% hm.]	Vodní souč. [-]	Kamenivo [% hm.]
S1	99,92	0,08	0,45	-
S2	33,32	0,03	0,53	66,65
S3	34,67	0,03	0,53	65,30
S4	32,82	0,03	0,53	67,15
S5	33,05	0,03	0,53	66,92

3.5 Pracovní postupy

3.5.1 Prosévací zkouška a sjednocení zrnitosti kameniva

Křivka zrnitosti všech použitých druhů kameniva byla sjednocena [69, 70]. Jako referenční byla brána křivka zrnitosti normalizovaného písku. Stanovení zrnitosti normalizovaného písku (P2) probíhalo podle normy ČSN EN 933-2 [71]. Byla použita síta o jmenovité velikosti otvorů 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm a 4 mm. Navážka byla prosévána mechanicky a prosévání bylo dokončeno pro každé síto ručně. Hmotnost zbytků na každém síte byla vyjádřena jako procento hmotnosti původní vysušené navážky. Dále bylo ověřeno, že se součet hmotností zůstatků na jednotlivých sítích neliší o více než o 1 % od původní navážky. Výsledná křivka zrnitosti normalizovaného písku (P2) je na Obr. 14 (viz také [69]).

Podle této křivky byla provedena úprava zrnitosti kameniva pro ostatní směsi (P3, P4 a P5). Každý druh kameniva byl proséváním rozdělen na jednotlivé frakce a tyto frakce byly následně smíchány v požadovaném poměru.



Obr. 14: Křivka zrnitosti drobného kameniva

3.5.2 Výroba zkušebních těles

Z navržených směsí bylo vyrobeno několik typů zkušebních těles - trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, válce o průměru 120 mm a výšce 30 mm a vrstva omítky o tloušťce asi 1 cm a ploše asi 30 x 20 cm nanesená na navlhčený pórobetonový podklad. Zkušební tělesa byla vyráběna v laboratorních podmínkách podle normy ČSN EN 13454-2+A1 [51]. Nejprve byla záměsová voda odměřena v odměrném válci a přelita do míchací nádoby. V záměsové vodě byla rozpuštěna kyselina citronová. Po vsypání sádry do záměsové vody následovalo míchání v normové míchačce s cyklem: 30 s nízkou rychlostí, 30 s vsypávání kameniva při nízké rychlosti (u směsí s kamenivem), 30 s vysokou rychlostí, 90 s přerušení míchání (během prvních 15 s byla vždy ručně setřena malta ze stěn míchací nádoby), 60 s vysokou rychlostí. Další postup se u jednotlivých zkušebních těles lišil.

V případě trámečků probíhalo plnění předem vymazaných forem ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva byla zhutněna šesti údery ručně a pomocí automatického střásacího zařízení. Celková doba hutnění byla 120 s. Poté bylo přebytečné množství malty seříznuto rovným kovovým nožem. Odformování probíhalo v rozmezí 60 - 90 minut po plnění forem. Zkušební tělesa byla uložena do prostředí o teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(50 \pm 5) \%$. Po šesti dnech byla zkušební tělesa vysušena při $50 ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti a bylo provedeno gravimetrické měření objemové hmotnosti.

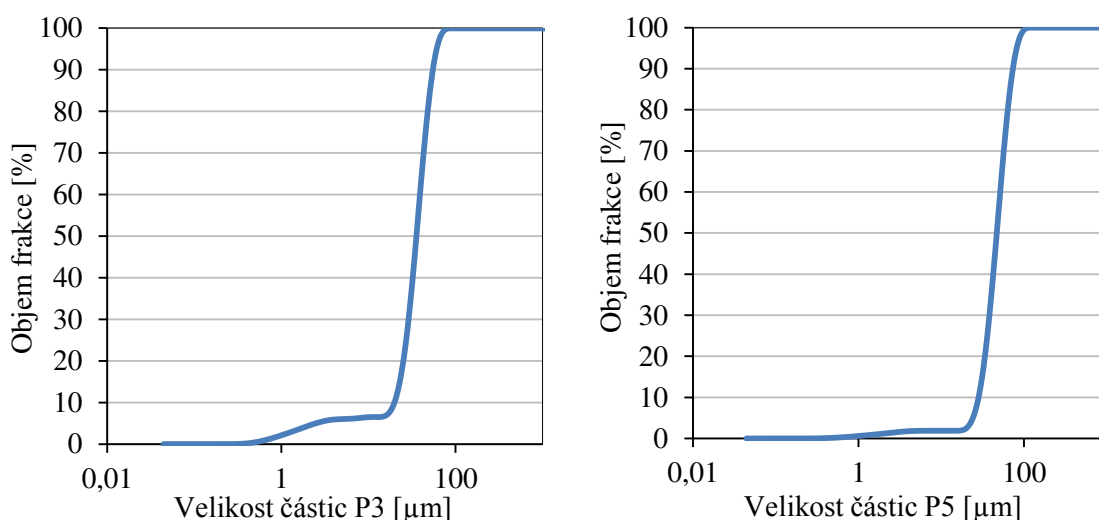
U zkušebních těles tvaru válce probíhalo hutnění pouze ručně. Další postup byl stejný jako v případě trámečků.

Vrstva omítky pro zkoušku přídržnosti byla nanášena pomocí špachtle a zednické lžice na předem navlhčený pórobetonový podklad a povrch omítky byl následně zarovnán pilovitým pohybem. Omítka byla ponechána 7 dní v prostředí o teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(65 \pm 5) \%$.

3.6 Výsledky měření a diskuze

3.6.1 Analýza distribuce jemných částic

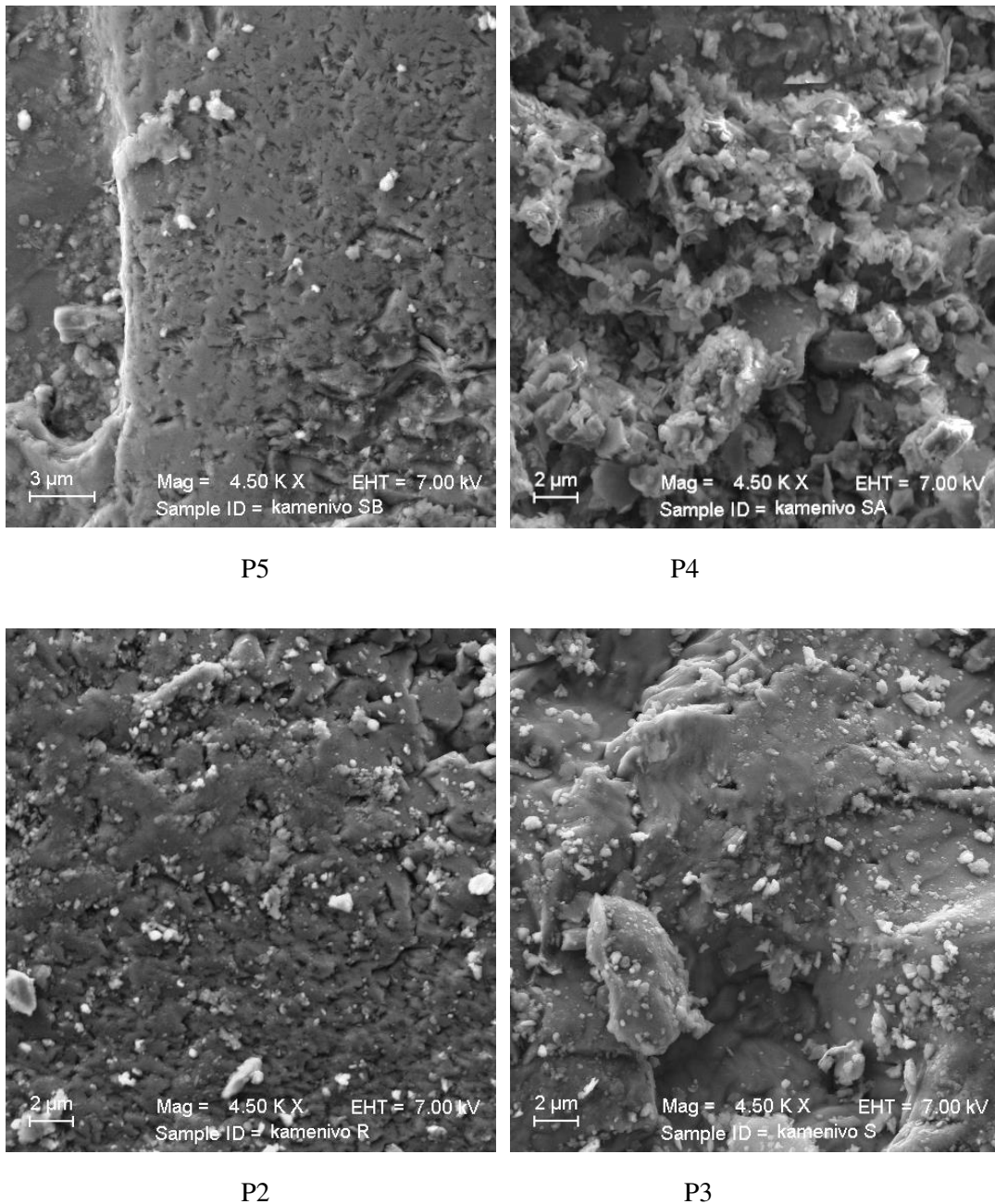
Podle výsledků analýzy distribuce jemných částí na Obr. 15 má drobné kamenivo P3 (sklářský písek) v porovnání s kamenivem P5 (říční písek) větší podíl částic o průměru do 10 μm . Značný podíl částic o průměru do 10 μm je zřetelně vidět i na fotografii na Obr. 16 P3 v 3.6.2.



Obr. 15: Distribuce jemných částic plniv P3 (se sklářským pískem) a P5 (s říčním pískem)

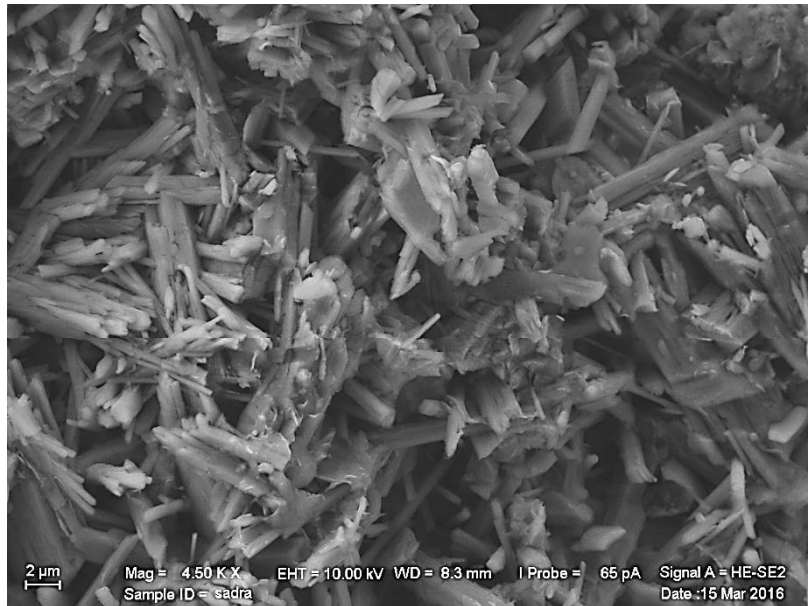
3.6.2 Průzkum tranzitní zóny

Na základě fotografií pořízených pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byly hledány nejprve souvislosti mezi původem kameniva, respektive drsností povrchu zrn a tvarem zrn, a velikostí krystalů zatvrdlé sádry v blízkosti zrn. Na fotografiích na Obr. 16 jsou povrchy zrn. Je patrné, že drsnosti jejich povrchů se liší. Nejhladší povrch mají zrna říčního písku P5, a to i v mikroskopickém měřítku. Nejdrsnější povrch má drcené kamenivo P4. Drsnost povrchu zrn normalizovaného písku P2 a sklářského písku P3 se příliš neliší.



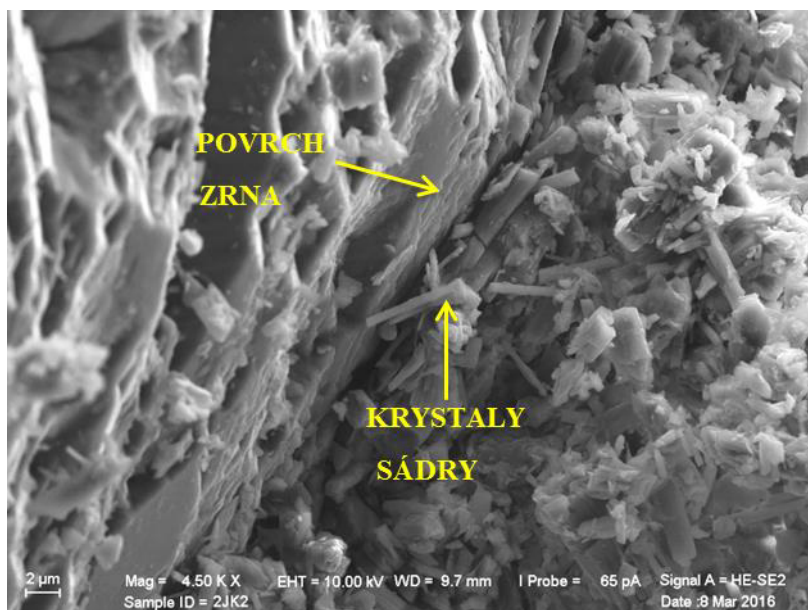
Obr. 16: Povrch zrn drobného kameniva: říční písek P5, drcené kamenivo P4, normalizovaný písek P2, sklářský písek P3 ,

Struktura zatuhlé sádry bez plniva (S1) je zřejmá na Obr. 17. Skládá se z dlouhých jehličkovitých krystalků o délce převážně nad 2 μm .

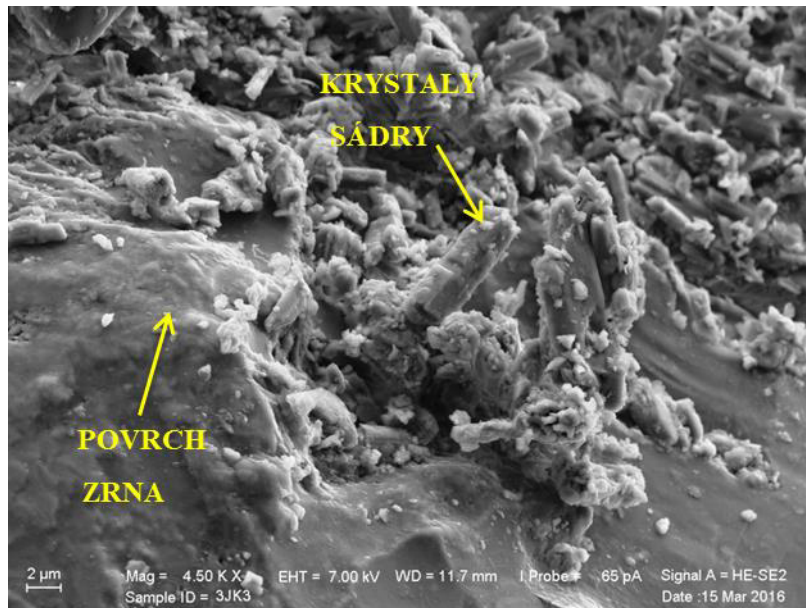


Obr. 17: Struktura zatvrdlé sádry (S1)

Struktura sádry v tranzitních zónách jednotlivých směsí je na Obr. 18, Obr. 19, Obr. 20 a na Obr. 21. Ve všech případech se v tranzitní zóně vytvořily menší krystaly, než má zatvrdlá sádra bez plniva. U směsí S2 (s normalizovaným pískem) a S3 (s sklářským pískem) mají krystaly v tranzitní zóně převážně destičkovitý tvar a velikost asi 2 µm a místy jehličkovitý tvar s délkou nad 2 µm.

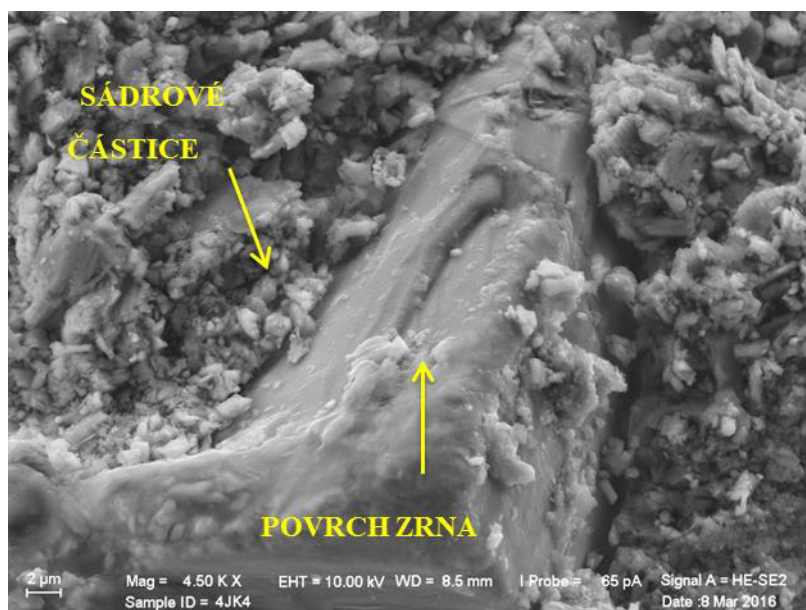


Obr. 18: Tranzitní zóna směsi S2 (s normalizovaným pískem)



Obr. 19: Tranzitní zóna směsi S3 (se sklářským pískem)

V tranzitní zóně ve směsi S4 (s drceným kamenivem) jsou převážně beztvare částice menší než 2 μm (viz Obr. 18). Od této tranzitní zóny se výrazně liší tranzitní zóna směsi S5 (s říčním pískem), ve které se vytvořily dlouhé jehličkovité krystaly (viz Obr. 19). Tyto dlouhé krystaly méně přiléhají k povrchu a způsobují pórovitější strukturu v tranzitní zóně.



Obr. 20: Tranzitní zóna směsi S4 (s drceným kamenivem)



Obr. 21: Tranzitní zóna směsi S5 (s říčním pískem)

Na základě fotografií z elektronového mikroskopu byla vytvořena Tab. 12, ve které je zaznamenáno hodnocení drsnosti povrchu zrn a krystalů v tranzitní zóně. V posledním sloupci je subjektivní hodnocení velikosti krystalů.

Tab. 12: Hodnocení tranzitní zóny

Směs	Kamenivo	Povrch zrn	Tvar krystalů	Velikost krystalů
S2	normalizovaný písek	středně drsný	destičkovité + místy delší jehličky	střední (cca 2 μm)
S3	sklářský písek	středně drsný	destičkovité + místy delší jehličky	střední (cca 2 μm)
S4	drcené kamenivo	drsný	beztvaré částice	malá (do 2 μm)
S5	říční písek	hladký	jehličky	velká (nad 2 μm)

Z Tab. 12 je patrné, že s rostoucí drsností povrchu zrn klesá velikost krystalů v tranzitní zóně kolem těchto zrn.

3.6.3 Hodnota rozlití a počátek tuhnutí

Hodnoty rozlití se u všech směsí kromě směsi S4 (s drceným kamenivem) pohybují v rozmezí 141 – 151 mm. Malý rozptyl těchto hodnot byl vzhledem k dávkování očekáván. Výjimkou je hodnota rozlití u směsi S4, což je dáno naprosto odlišným tvarem zrn drceného kameniva, které bylo do této směsi použito. V porovnání s ostatními druhy písků má drcené kamenivo (S4) zrna spíše nekubického formátu s ostřejšími hranami, zatímco ostatní písky

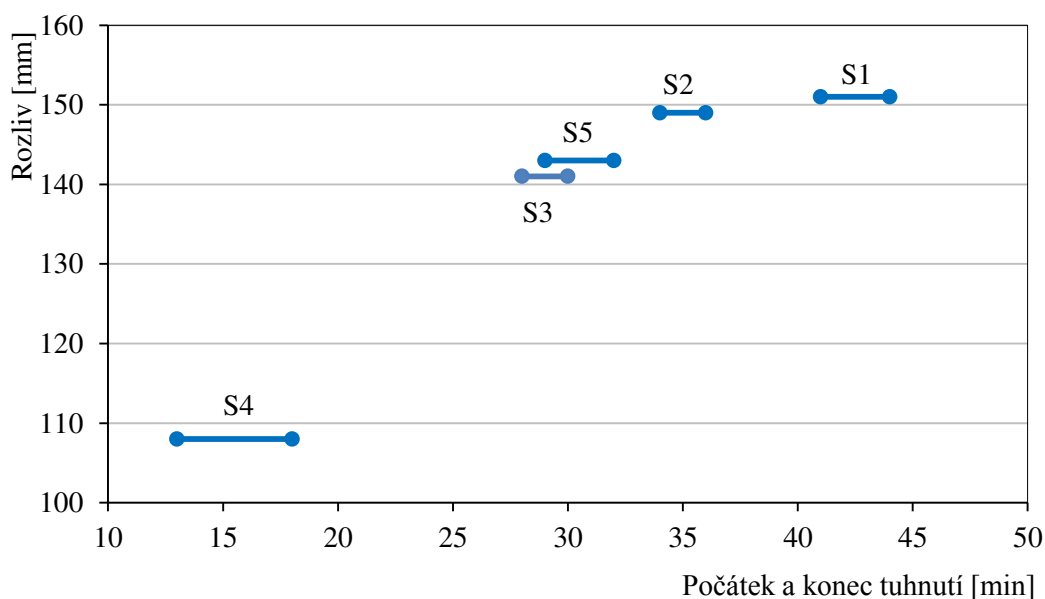
mají zrna zaoblená. Rozliv je ovlivněn zaklíněním zrn mezi sebou a velikostí smáčené plochy zrn.

Hodnoty rozlití všech směsí jsou uvedeny v Tab. 13 společně s jejich počátkem a koncem tuhnutí [70]. Důvodem pro vyjádření výsledků pomocí jedné tabulky je vzájemná závislost těchto měřených veličin - s větší hodnotou rozlití dochází k oddálení tuhnutí.

Tab. 13: Hodnoty rozlití a počátky tuhnutí směsí

Směs	Hodnota rozlití [mm]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]
S1 (bez plniva)	151	41	44
S2 (normalizovaný)	149	34	36
S3 (sklářský)	141	28	30
S4 (drcený)	108	13	18
S5 (říční)	143	29	32

Závislost počátku tuhnutí na rozlivu je dobře patrná na Obr. 22. Počátek tuhnutí nastává u nejhůře zpracovatelné směsi S4 dříve než u směsi s vyšším rozlivem [70]. Dále je z Obr. 22 zřejmé, že směs bez písku začíná tuhnout nejpozději a lze proto konstatovat, že drobné plnivo v sádrové směsi urychluje počátek tuhnutí. Doba tuhnutí je velmi krátká, u všech směsí se pohybuje pod 5 minut. Nejdelší doba tuhnutí u směsi S4 je opět způsobena odlišným tvarem zrn.



Obr. 22: Závislost počátku a konce tuhnutí na rozlivu

Pro lepší představu o zpracovatelnosti navržených směsí je uveden obrázek 23 [69], na kterém je patrné odlišné chování sádrové malty a sádrové kaše při stejném normovém rozlivu (150 ± 5 mm).



Obr. 23: Chování čerstvé malty S2 s normalizovaným pískem a sádry bez plniva S1

3.6.4 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost jednotlivých směsí [69] je uvedena v Tab. 14 společně s pórovitostí a hustotou [69], se kterými souvisí. Uvedená hustota zahrnuje v případě směsí s kamenivem sádrové pojivo i kamenivo.

Tab. 14: Objemové hmotnosti směsí

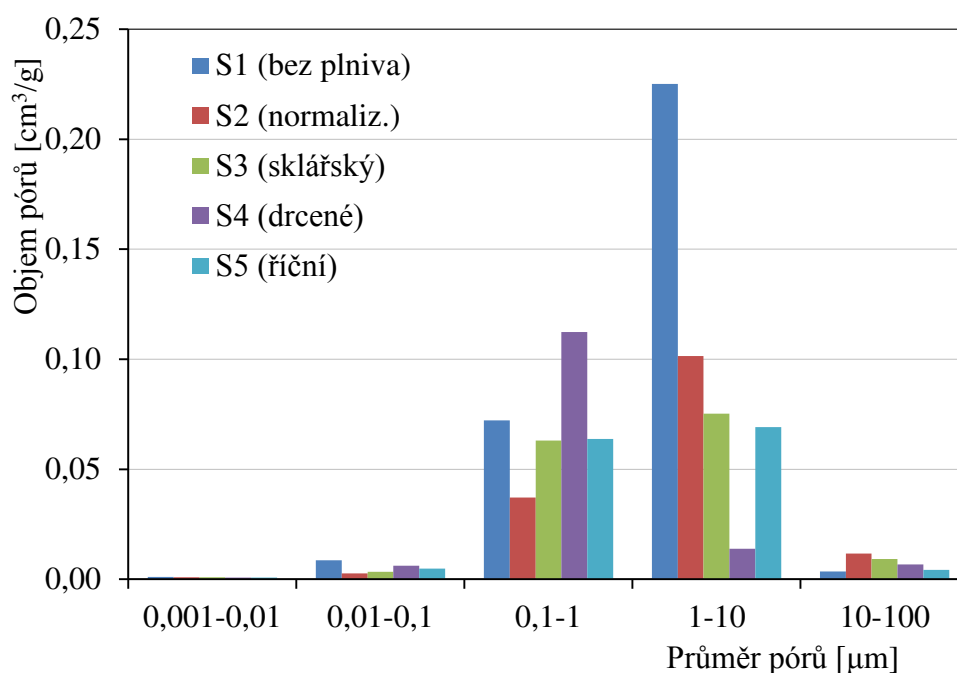
Veličina	Objemová hmotnost	Pórovitost	Hustota*
Jednotky	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]
S1 (bez plniva)	1 311	43,4	2 316
S2 (normalizovaný)	1 764	27,8	2 443
S3 (sklářský)	1 780	22,4	2 294
S4 (drcený)	1 796	28,5	2 512
S5 (říční)	1 794	28,3	2 502

* uvažováno pojivo + kamenivo

Nejmenší objemovou hmotnost má jednoznačně směs S1 (bez plniva). Je to dáno nejvyšší pórovitostí a nízkou hustotou této směsi. Po přidání drobného plniva do sádry objemová hmotnost vzrostla asi o 30 % u všech navržených malt, jednak proto, že drobné kamenivo má větší objemovou hmotnost než sádrová pasta, a také proto, že přidáním kameniva byla snížena celková pórovitost. Celková pórovitost všech směsí s kamenivem dosahuje podobné hodnoty, což bylo vzhledem k dávkování jednotlivých druhů kameniva předpokládáno.

3.6.5 Pórovitost a distribuce pórů

Pro výsledné vlastnosti směsí, jako je transport tepla a vlhkosti, není rozhodující jen celková pórovitost, ale také distribuce pórů. Z grafu na Obr. 24 je patrné, jaký objem z celkové pórovitosti jednotlivých směsí zastupují póry určitých velikostí. Ve všech směsích převažují póry o velikostech 0,1 – 10 μm . Téměř totožná je distribuce pórů u směsí S3 (se sklářským pískem) a S5 (s říčním pískem). Oproti nim má směs S2 (s normalizovaným pískem) více pórů o průměru 1 – 10 μm na úkor pórů o průměru 0,1 – 1 μm . Rozdíl však není veliký. Výrazná změna v distribuci pórů nastává u směsi S4 (s drceným kamenivem), u které převládají póry o průměru 0,1 – 1 μm na úkor větších pórů. Tato směs má výrazně menší krystaly v tranzitní zóně než ostatní směsi. Naopak největší krystaly v celé struktuře má směs S1 (bez plniva), která má největší celkovou pórovitost. Tato směs má oproti směsím s kamenivem podstatně větší množství pórů o průměru 1 – 10 μm . Z toho vyplývá, že přidáním drobného kameniva do sádry dochází k úbytku pórů o velikosti 1 – 10 μm . Tento úbytek je mnohem výraznější v případě použití drceného kameniva s nepravidelným tvarem zrn (směs S4).



Obr. 24: Distribuce pórů vztahovaná ke hmotnosti pojiva a plniva [69]

Je třeba dodat, že na Obr. 24 je distribuce pórů vztahována ke hmotnosti sádry a plniva. Graf dobře vypovídá o pórovitosti materiálu jako celku, avšak nepřesně vystihuje pórovitost vlastního sádrového pojiva. Pro představu o změně pórovitosti a distribuci pórů v sádrovém

pojivu byla vytvořena Tab. 15 a Obr. 25, ve kterých je pórovitost i distribuce pórů vztažena ke hmotnosti sádrového pojiva. Při převodu pórovitosti na hmotnost pojiva bylo uvažováno, že hustota sádrového pojiva se rovná hustotě směsi S1 (bez plniva). Dále bylo uvažováno, že všechna kameniva jsou hutná.

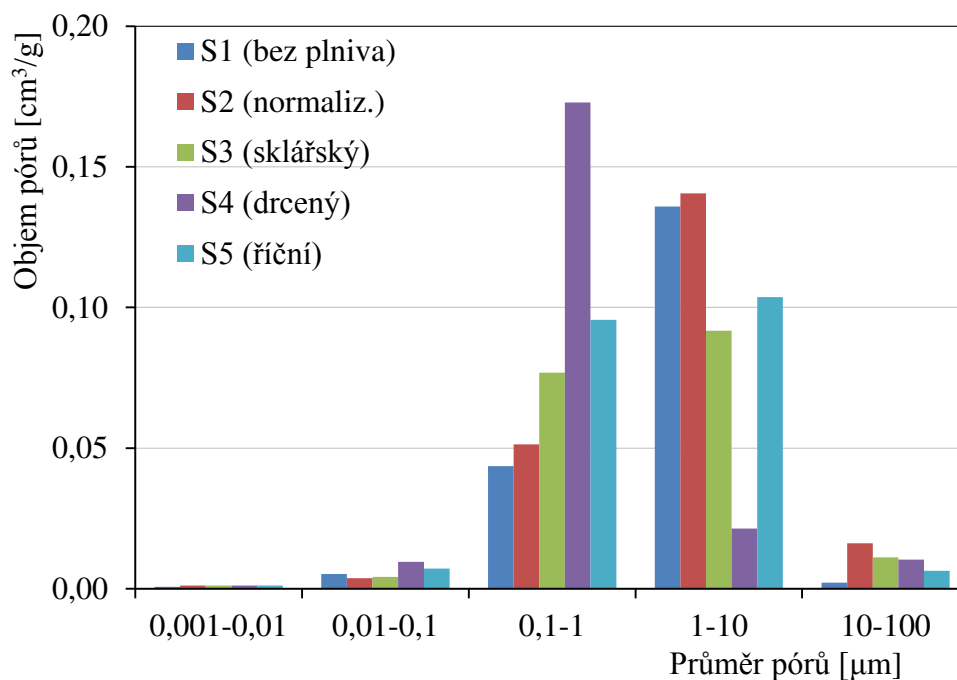
Tab. 15: Pórovitost vztažená k sádrovému pojivu

Označení směsi	S1	S2	S3	S4	S5
Kamenivo	bez plniva	normalizovaný	sklářský	drcený	říční
Pórovitost [%]	43	49	43	50	50

Z Tab. 15 je patrné, že směs S1 (bez plniva) má sádrové pojivo s nejmenší pórovitostí. U ostatních směsí je pórovitost stejná (směs S3) nebo vyšší (směsi S2, S4 a S5). Znamená to, že přidáním drobného kameniva dochází spíše ke zvýšení pórovitosti sádrového pojiva. Tento jev lze přisuzovat především tranzitní zóně na rozhraní mezi pojivem a plnivem, ve které dochází k vytvoření odlišné struktury sádry. Krystaly v tranzitní zóně mají menší rozměry, odlišný tvar a jsou méně prorostlé mezi sebou. Kromě toho tyto krystaly nedokonale přiléhají k povrchu zrn.

Nízkou pórovitost směsi S3 (se sklářským pískem) lze přisuzovat odlišné distribuci jemných částic (do 0,063 mm) obsažených v kamenivu P3, které efektivněji zaplnily póry. Kamenivo P3 obsahuje v porovnání s kamenivem P5 (říční) větší podíl částic o průměru do 10 μm (viz 3.6.1 a Obr. 15).

Rozdělení jednotlivých velikostí pórů vzhledem ke hmotnosti pojiva lze pozorovat na Obr. 25. Souhrnně lze po vztažení pórovitosti ke hmotnosti sádrového pojiva vyvodit podobné závěry jako při vztažení pórovitosti k celkové hmotnosti. Obr. 25 potvrzuje, že u směsi S4 (s drceným kamenivem) výrazně převládají póry o průměru 0,1 – 1 μm na úkor větších pórů. Tím se tato směs liší od ostatních směsí. Dále je z Obr. 25 patrné, že vzhledem ke hmotnosti pojiva má směs S1 (bez plniva) asi 3x více pórů o průměru 1 – 10 μm než pórů o průměru 0,1 – 1 μm , podobně jako směs S2 (s normalizovaným pískem). U ostatních směsí je tento poměr menší. Ke stejnému závěru vedl i Obr. 24, na kterém byla distribuce pórů vztažena k pojivu i plnivu. Zde však na rozdíl od Obr. 24 neplatí, že směs S1 (bez plniva) má oproti směsím s kamenivem podstatně větší množství pórů o průměru 1 – 10 μm . Také se zde výrazně liší celková pórovitost, která je nejmenší u směsi S1 (bez plniva).



Obr. 25: Distribuce pórů vztažená ke hmotnosti sádrového pojiva

3.6.6 Přídržnost

Přídržnost všech směsí byla zjišťována z pěti hodnot měření. Žádné měření nemuselo být vyřazeno z důvodu odtržení ve vrstvě lepidla mezi kruhovým terčem a maltou. Výsledky měření včetně způsobu porušení jsou zaznamenány v Tab. 16. Porušení a) (mezi maltou a podkladem), jehož výsledek nejlépe vystihuje přídržnost, ve většině měření převažoval. Výjimkou je směs S1 (sádra bez plniva), u které výrazně převažovalo porušení b) (v maltě). Znamená to, že tahová pevnost směsi S1 byla nižší než přídržnost k podkladu, a že experimentálně zjištěnou hodnotu lze považovat jen za minimální hodnotu přídržnosti deklarovanou výrobcem. Ve skutečnosti je přídržnost směsi S1 vyšší. Další směs, na kterou je třeba upozornit, je směs S4 (s drceným kamenivem), u které porušení a) převažuje jen nepatrně, a zjištěná hodnota přídržnosti je také menší, než skutečná přídržnost.

Tab. 16: Přídržnost a způsoby porušení

		Síla F_U	Přídržnost f_U	Porušení		
Jednotky		[N]	[N/mm ²]	a) přilnavosti	b) v maltě	c) v podkladu
S1 (bez plniva)	I	623	0,317	25%	75%	0%
	II	619	0,315	5%	95%	0%
	III	520	0,265	8%	92%	0%
	IV	620	0,316	50%	50%	0%
	V	466	0,237	0%	100%	0%
	Průměr		0,29 ± 0,03			
S2 (normaliz.)	I	360	0,183	100%	0%	0%
	II	565	0,288	60%	40%	0%
	III	1093	0,557	70%	20%	10%
	IV	265	0,135	100%	0%	0%
	V	1003	0,511	70%	10%	20%
	Průměr		0,3 ± 0,2			
S3 (sklářský)	I	796	0,405	80%	8%	12%
	II	956	0,487	95%	0%	5%
	III	768	0,391	75%	15%	10%
	IV	1125	0,573	40%	30%	30%
	V	1277	0,650	70%	25%	5%
	Průměr		0,5 ± 0,1			
S4 (drcený)	I	972	0,495	50%	40%	10%
	II	1087	0,554	50%	45%	5%
	III	987	0,503	50%	42%	8%
	IV	978	0,498	60%	30%	10%
	V	847	0,431	70%	25%	5%
	Průměr		0,50 ± 0,05			
S5 (říční)	I	715	0,364	60%	30%	10%
	II	607	0,309	80%	0%	20%
	III	965	0,491	40%	60%	0%
	IV	535	0,272	75%	25%	0%
	V	375	0,191	80%	20%	0%
	Průměr		0,3 ± 0,1			

K porušení b) (v maltě) došlo u většiny měření cca ve 30 % plochy (kromě již zmíněné směsi S). K porušení c) (v podkladu) došlo v několika případech, a to maximálně ve 20 % plochy. Z těchto poznatků vyplývá, že u směsí S2, S3 a S5 je výsledná hodnota přídržnosti jen zanedbatelně nižší, než skutečná přídržnost. Dále z popsaných typů porušení vyplývá, že u směsi S4 (s drceným kamenivem) je skutečná přídržnost mírně vyšší, než naměřená hodnota. Největší nepřesnost je u směsi S1 (sádra bez písku), u které byla naměřena nejnižší přídržnost (0,290 MPa) ze všech směsí. Kvůli převažujícímu porušení b) (v maltě) nelze

tvrdit, že sádra bez plniva má nižší přídržnost než sádra s plnivem, ale lze konstatovat, že má nižší pevnost v tahu.

Při srovnání směsí s drobným plnivem vychází nejnižší přídržnost u směsí S2 (s normalizovaným pískem) a S5 (s říčním pískem). Vyšší přídržnost má směs S3 (se sklářským pískem), což lze přisoudit většímu podílu jemných částic o velikosti do 10 μm (viz 3.6.1). Vysoká přídržnost byla naměřena také u směsi S4 (s drceným kamenivem), u které lze vzhledem ke způsobu porušení ve skutečnosti předpokládat mírně vyšší přídržnost.

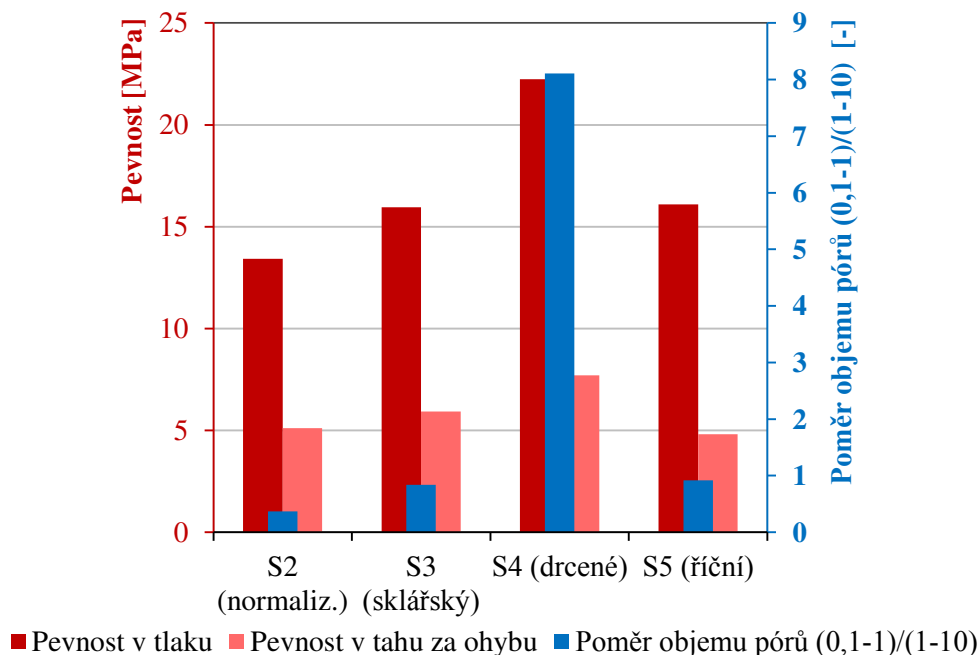
Z uvedených hodnot vyplývá, že drobné kamenivo nezhoršuje přídržnost směsi a přispívá k lepší pevnosti v tahu. Jako nejvhodnější z hlediska přídržnosti se jeví použití drceného kameniva (S4).

3.6.7 Pevnost

Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu jednotlivých směsí včetně směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tab. 17. Poslední řádek této tabulky dokládá souvislost mezi distribucí pórů ve směsi a pevností. Je v něm uveden poměr mezi objemovým zastoupením pórů o průměru 0,1 – 1 μm a objemovým zastoupením pórů o průměru 1 – 10 μm ve směsi. Ostatní póry lze pro zjednodušení zanedbat, protože ve všech směsích převládají póry o průměru 0,1 – 10 μm . Ve všech směsích s kamenivem (S2, S3, S4 a S5) je celková pórovitost srovnatelná, a díky tomu lze rozdílnou pevnost těchto směsí připisovat odlišné distribuci pórů. Z Tab. 17. je patrné, že vyšší pevnost v tahu i v tahu za ohybu mají malty, které mají více menších pórů na úkor větších pórů, tedy větší hodnotu poměru objemu pórů o velikosti 0,1 - 1 μm a 1 - 10 μm . Pro lepší přehlednost je tento jev vyjádřen také grafem na Obr. 26.

Tab. 17: Pevnosti směsí ve vztahu k distribuci pórů

Označení směsi	S1	S2	S3	S4	S5
Kamenivo	bez plniva	normaliz.	sklářský	drcený	říční
Pevnost v tlaku [MPa]	18 ± 2	13,4 ± 0,7	16 ± 1	22 ± 1	16 ± 1
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	7,7 ± 0,4	5,1 ± 0,6	5,9 ± 0,5	8 ± 1	4,8 ± 0,5
Poměr objemu pórů (0,1-1)/(1-10)	0,32	0,37	0,84	8,11	0,92

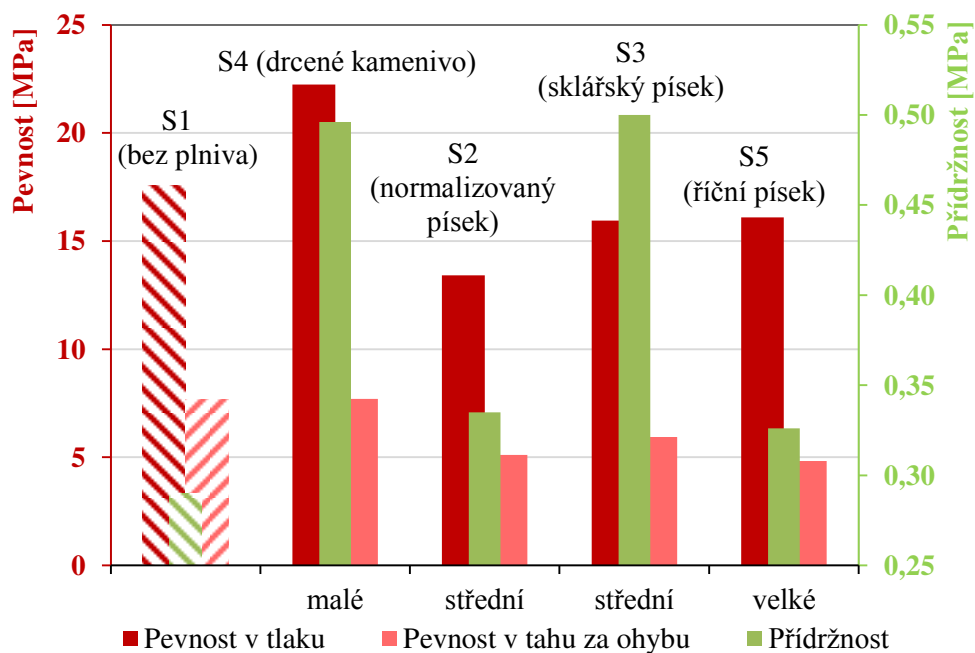


Obr. 26: Vliv distribuce pórů na pevnosti sádrových malt

Směs S1 (bez plniva) v grafu na Obr. 26 není uvedena, protože u této směsi nelze odlišnou pevnost připisovat jen jiné distribuci pórů. Celková pórovitost této směsi je výrazně vyšší než v ostatních směsích a pevnost této směsi je pozitivně ovlivněna nepřítomností tranzitní zóny.

Rozdílná distribuce pórů souvisí s odlišným tvarem zrn a drsností povrchu zrn v jednotlivých směsích a tedy i s odlišnou tranzitní zónou v jednotlivých směsích. Pro lepší interpretaci vztahu mezi pevnostmi, přídržnostmi a velikostí krystalů v tranzitní zóně byl vytvořen graf na Obr. 27.

Na grafu na Obr. 27 na vodorovné ose roste směrem doprava velikost krystalů v tranzitní zóně a směrem doleva drsnost povrchu zrn (výsledky z 3.6.2). Je zřejmé, že z hlediska pevnosti i přídržnosti je sádra bez plniva srovnatelná se sádrou s drobným kamenivem. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosahuje směs S4 (s drceným kamenivem), která má nejmenší krystaly v tranzitní zóně. Naopak směs S5 s největšími krystaly v tranzitní zóně (s říčním pískem) má nejnižší pevnost v tahu za ohybu a nejnižší přídržnost ze směsí s kamenivem. Z naměřených údajů plyne, že zaoblená zrna s hladkým povrchem způsobují nižší pevnost a přídržnost malty než podlouhlá zrna s drsným povrchem. Pevnost i přídržnost je vyšší u směsí s malými krystaly v tranzitní zóně.



Obr. 27: Přídržnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku

3.6.8 Tepelné a difúzní vlastnosti

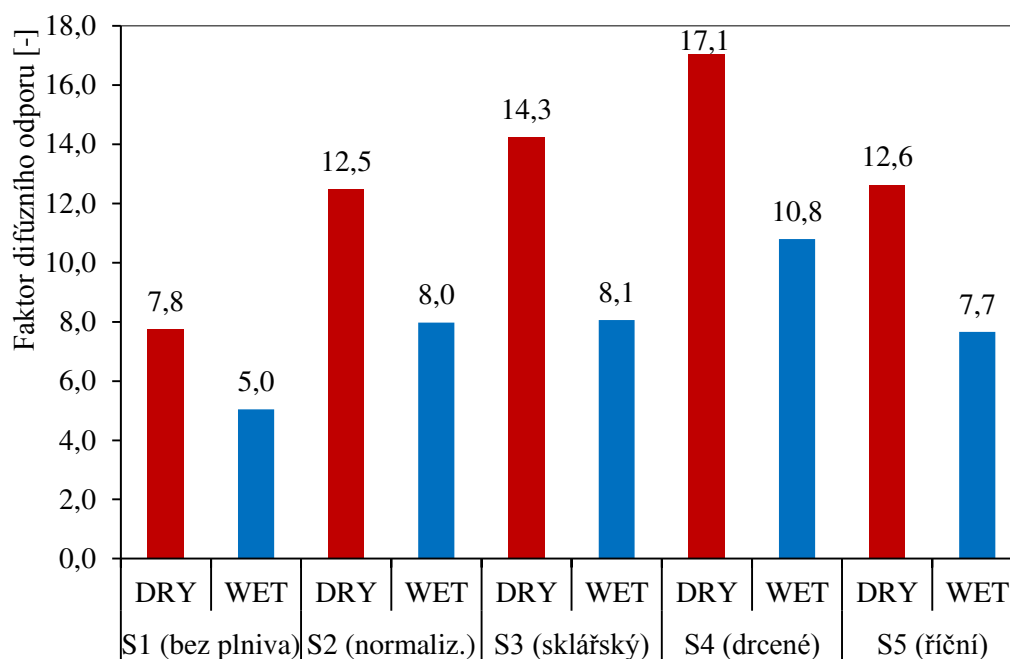
Tepelné a difúzní vlastnosti běžných materiálů výrazně závisí na pórovitosti (s vyšší pórovitostí obvykle tepelná vodivost i difúzní odpor klesá) a na distribuci pórů. Výjimkou nejsou ani zkoumané směsi. Jak je patrné z Tab. 18, směsi s plnivem, které mají cca o 30 % větší objemovou hmotnost a o cca 40 % menší pórovitost než směs S1 (bez plniva), mají také více než dvakrát větší součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)] a o polovinu větší měrnou tepelnou kapacitu c [J/(kg·K)] než směs S1 (bez plniva).

Při porovnání měrných tepelných kapacit jednotlivých směsí s plnivem nejsou patrné velké rozdíly. K zamyšlení vede součinitel tepelné vodivosti směsi S4 (s drceným kamenivem), který jako jediný ze směsí s plnivem nepřesahuje hodnotu 1 W/(m·K). Protože pórovitosti jednotlivých směsí s kamenivem se příliš nelišily, lze nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti přisuzovat odlišné distribuci pórů v této směsi. Tato směs obsahovala více pórů o průměru 0,1 – 1 μm na úkor pórů o řád větších. U ostatních směsí bylo naopak více pórů o velikosti 1 – 10 μm . Souhrnně lze tedy tvrdit, že přidáním drceného ostrohranného kameniva, které způsobuje vznik většího množství menších pórů (na rozdíl od zaobleného kameniva), je dosaženo lepších tepelně izolačních vlastností sádrové směsi, než při použití zaobleného kameniva. Pro lepší přehlednost je v Tab. 18 opět uveden poměr mezi objemovým zastoupením pórů o průměru 0,1 – 1 μm a objemovým zastoupením pórů o průměru 1 – 10 μm ve směsi (stejně jako v Tab. 17 v 3.6.7).

Tab. 18: Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita směsí

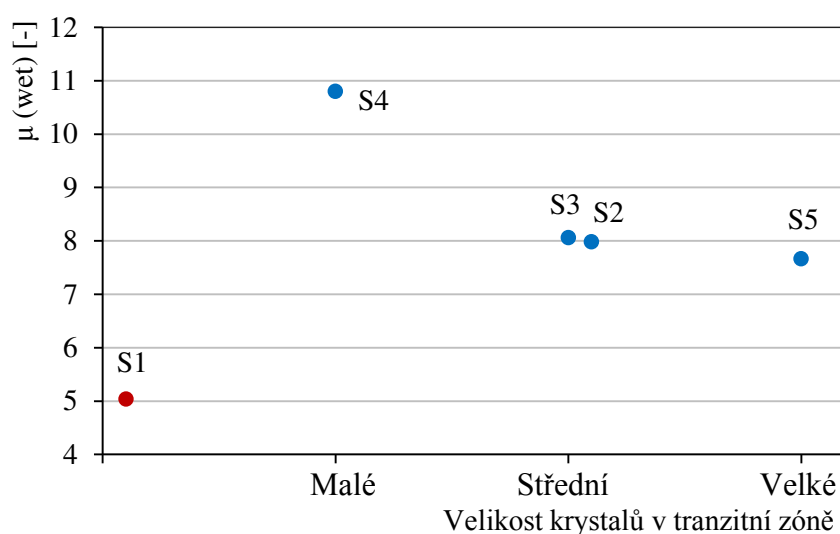
Označení směsi	S1	S2	S3	S4	S5
Kamenivo	bez plniva	normaliz.	sklářský	drcený	říční
λ [W/(m·K)]	0,43	1,16	1,14	0,92	1,27
c [J/(kg·K)]	1310	1750	1780	1760	1790
Poměr objemu pórů (0,1-1)/(1-10)	0,32	0,37	0,84	8,11	0,92

Difúzní odpor jednotlivých směsí je vyjádřen grafem na Obr. 28. Pro všechny směsi je uveden faktor difúzního odporu získaný metodou dry cup i metodou wet cup. Rozdíl ve výsledcích obou metod je způsoben tím, že propustnost pro vodní páru daného materiálu závisí na relativní vlhkosti [55]. Propustnost pro vodní páru také závisí na pórovitosti materiálu, proto nejpórovitější směs S1 (bez plniva) má nejnižší faktor difúzního odporu. Nejvyšší faktor difúzního odporu má směs S4 (s drceným kamenivem). To lze vysvětlit odlišnou distribucí pórů v této směsi – vodní pára procházela pomaleji velkým množstvím menších pórů (o průměru 0,1 – 1 μm). V ostatních směsích probíhal transport vodní páry rychleji, protože směsi obsahovaly více větších pórů (o průměru 1 – 10 μm).

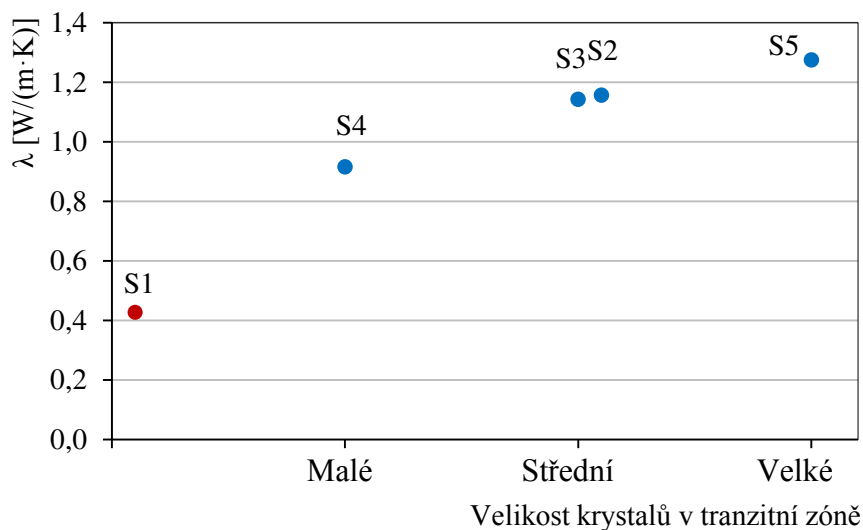


Obr. 28: Faktor difúzního odporu směsí

Pro přehlednější vyhodnocení vlivu kameniva a velikosti krystalů v tranzitní zóně jsou hodnoty součinitele tepelné vodivosti a faktoru difúzního odporu zkoumaných směsí vyneseny do grafů na Obr. 29 a Obr. 30. Na vodorovné ose směrem doprava roste velikost krystalů a směrem doleva roste drsnost povrchu zrn. Směs S1 (bez plniva) má nejnižší součinitel tepelné vodivosti i faktor difúzního odporu. U směsí s kamenivem je určitý trend nárůstu součinitele tepelné vodivosti s rostoucí velikostí krystalů v tranzitní zóně. Malé krystaly (a s tím související vznik malých pórů o průměru 0,1 – 1 μm) způsobují lepší tepelně izolační vlastnosti než velké krystaly (a větší póry). Malé póry také vedou k pomalejšímu transportu vodní páry než póry o řád větší.



Obr. 29: Faktor difúzního odporu v závislosti na velikosti krystalů v tranzitní zóně



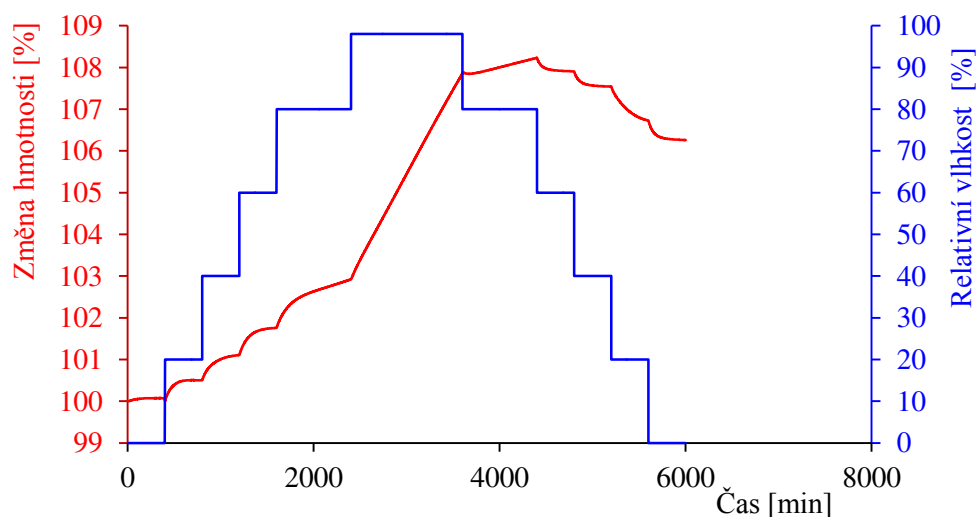
Obr. 30: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na velikosti krystalů v tranzitní zóně

3.6.9 Dynamické měření sorpce

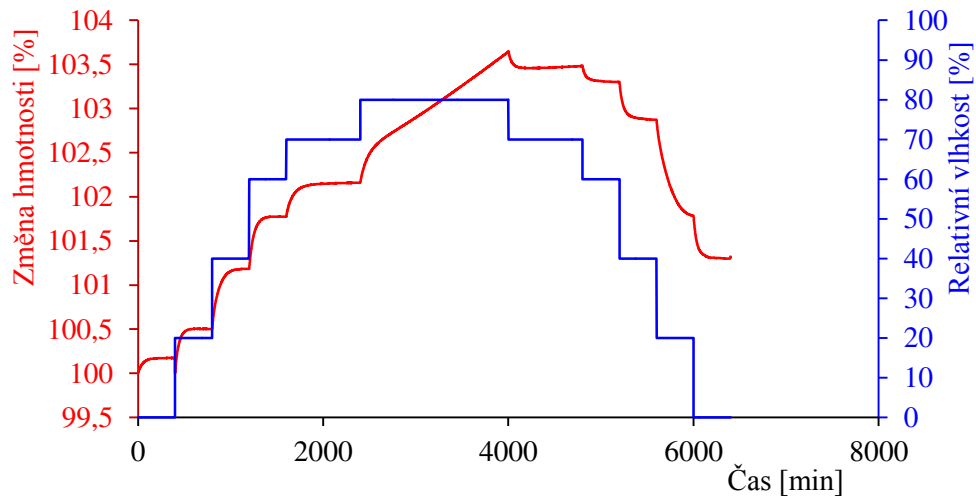
Dynamické měření sorpce bylo provedeno dvakrát pro směsi S1 a S2, a jednou pro směsi S3, S4 a S5. Měření probíhalo při teplotě $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Při jednotlivých měřeních byly zvoleny časové kroky a relativní vlhkosti:

- krok (S2, S3, S4): 400 min pro φ [%] = 0, 20, 40, 60, 80, 98;
- krok (S1, S5): 400 min pro φ [%] = 0, 20, 40, 60;
800 min pro φ [%] = 80;
1 200 min pro φ [%] = 98;
- krok (S1, S2): 400 min pro φ [%] = 0, 20, 40, 60;
800 min pro φ [%] = 70;
1 600 min pro φ [%] = 80.

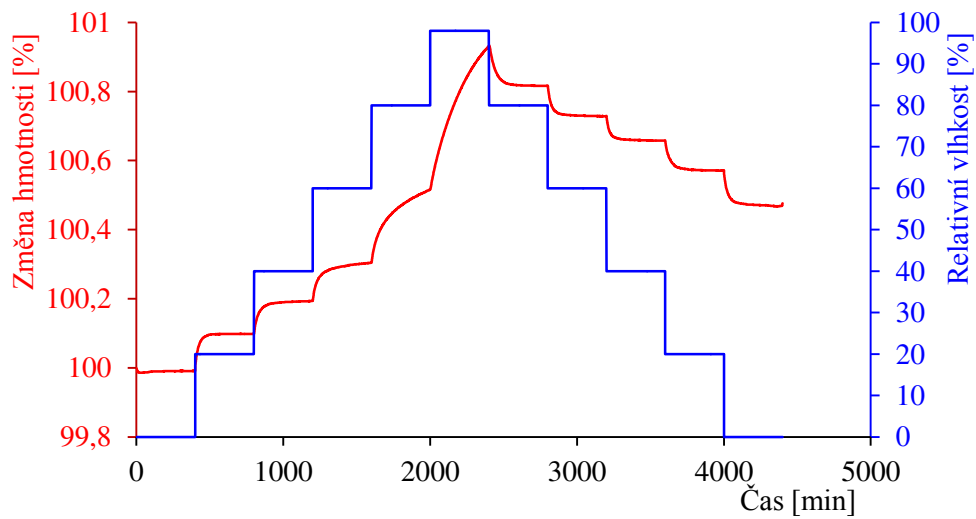
Rozdílné průběhy měření při volbě různých kroků jsou patrné z Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33 a Obr. 34. Na grafech jsou modrou čarou vyznačeny změny relativní vlhkosti a červeně hmotnostní změny vzorku.



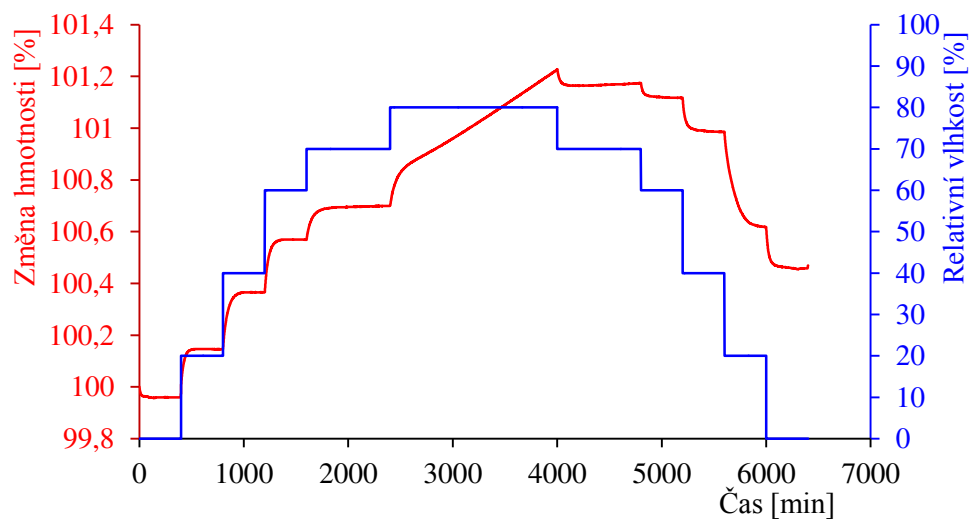
Obr. 31: DVS: Průběh měření 1, směs S1 (bez plniva)



Obr. 32: DVS: Průběh měření 2, směs S1 (bez plniva)

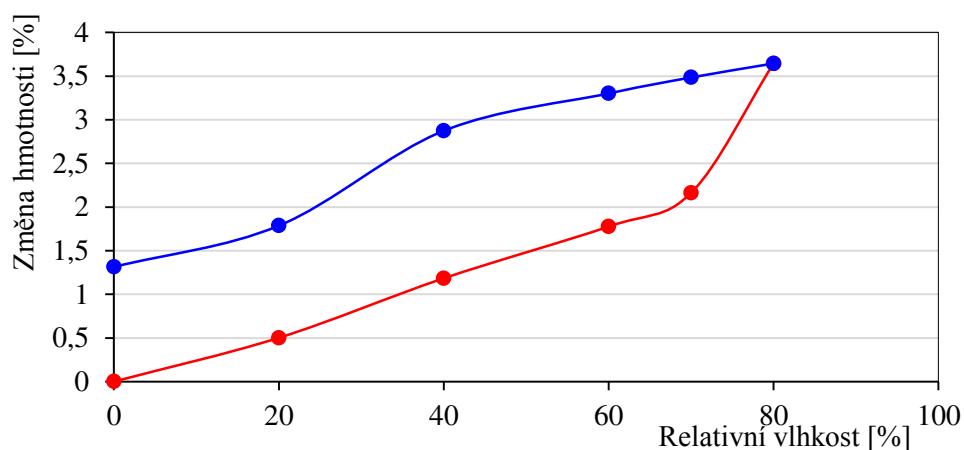


Obr. 33: DVS: Průběh měření 1, směs S2 (s normalizovaným pískem)

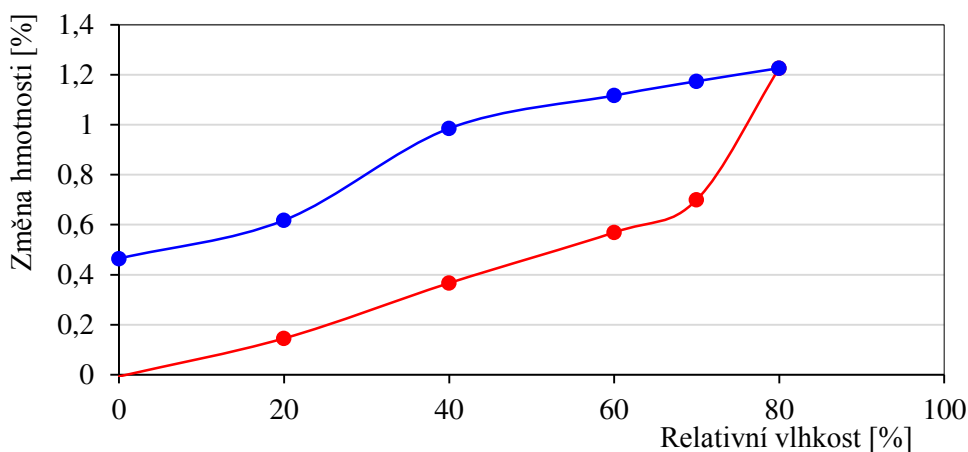


Obr. 34: DVS: Průběh měření 2, směs S2 (s normalizovaným pískem)

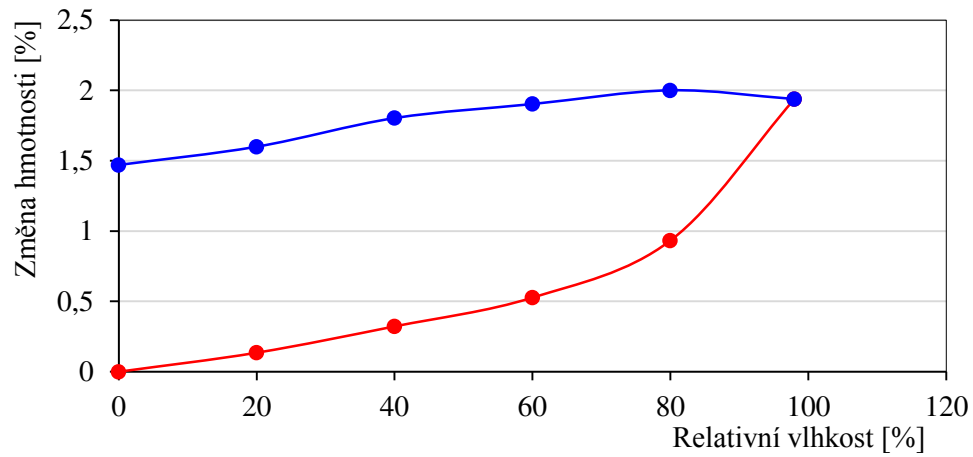
Při časovém kroku 400 min a zvyšování relativní vlhkosti docházelo u vzorků k nárůstu hmotnosti. V oblasti maximální vlhkosti nedošlo k ustálení hmotnosti a při následném snižování vlhkosti hmotnost v některých vzorcích ještě určitou dobu narůstala. Ani při delším časovém kroku pro maximální relativní vlhkosti nedošlo k ustálení hmotností. Nicméně při následném snižování vlhkosti hmotnost už nenarůstala. Neustálení hmotnosti vzorku při vyšších relativních vlhkostech může být vysvětlováno kondenzací vody na stěnách pórů (která nastává po monomolekulární adsorpci a multi-molekulární adsorbci na povrchu pórů [53]) a částečně také chemickými reakcemi (jako je hydratace dosud nezhydratovaného $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, popř. CaSO_4). Z průběhů měření je patrný také velmi rychlý nárůst hmotnosti u směsi S1 (bez plniva) při relativní vlhkosti 98 %. Tato směs pohlcuje vzdušnou vlhkost rychleji, než směsi s pískem. Pro porovnání všech směsí jsou na Obr. 35, Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38 a Obr. 39 uvedeny jejich sorpční izotermy. U směsí S1 a S2 jsou uvedeny jen izotermy z měření s delším časovým krokem.



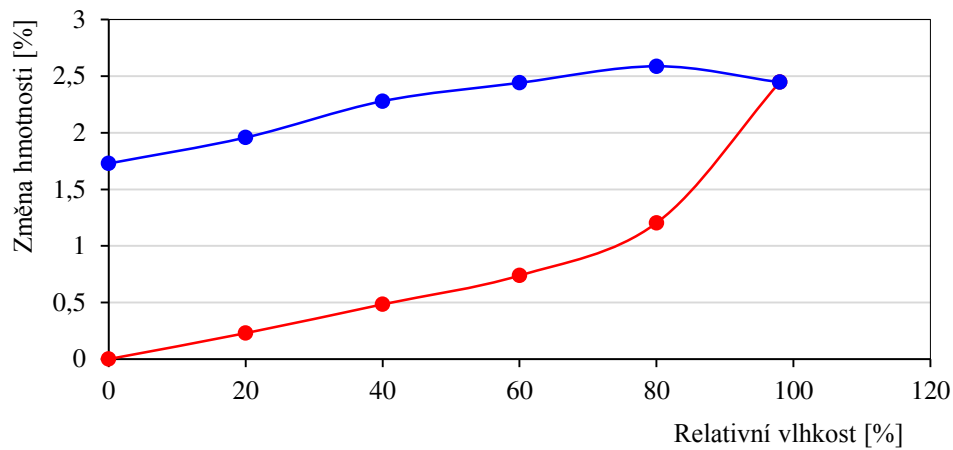
Obr. 35: DVS: Sorpční izoterma směsi S1 (bez plniva)



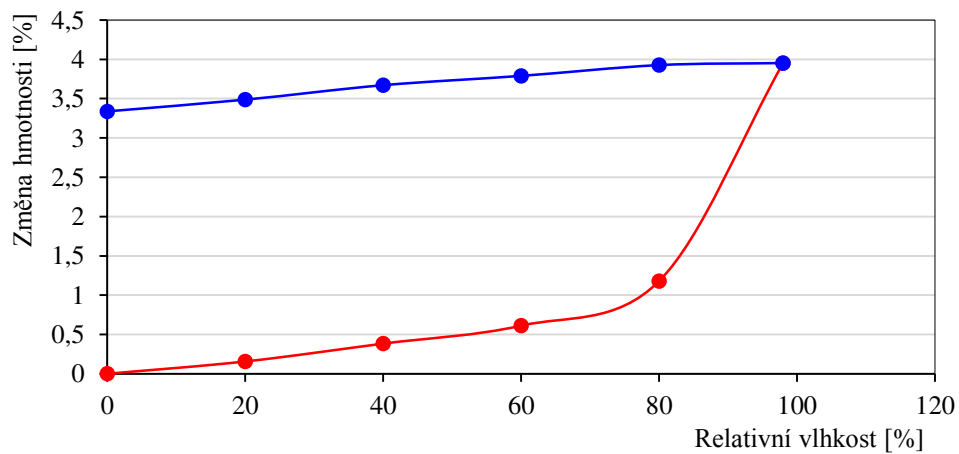
Obr. 36: DVS: Sorpční izoterma směsi S2 (s normalizovaným pískem)



Obr. 37: DVS: Sorpční izoterma směsi S3 (se sklářským pískem)



Obr. 38: DVS: Sorpční izoterma směsi S4 (s drceným kamenivem)



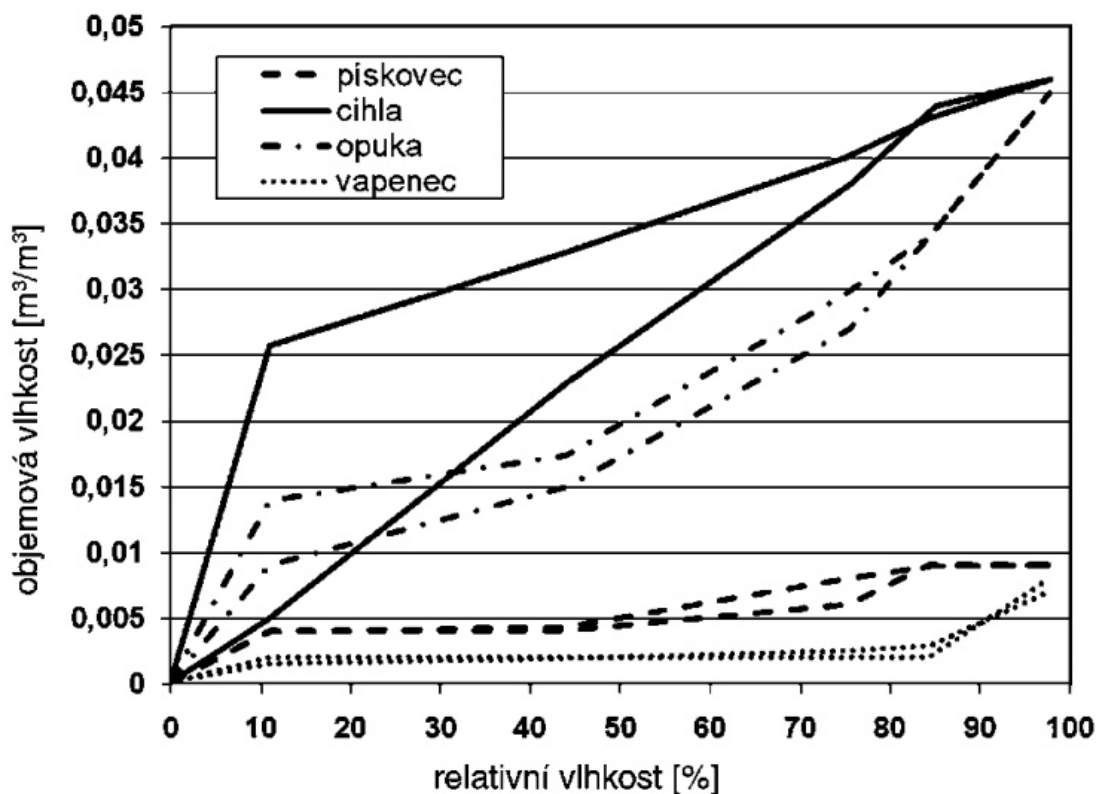
Obr. 39: DVS: Sorpční izoterma směsi S5 (s říčním pískem)

U všech sorpčních izoterem je patrné, že při relativní vlhkosti mezi 70 % a 80 % nastává zlom, od kterého hmotnost narůstá výrazně rychleji. To je podle [72] připisováno kapilární

kondenzaci v pórech větších než $0,1 \mu\text{m}$. Ke kondenzaci vodních par v těchto pórech tak dochází i při relativních vlhkostech zhruba od 50 %.

U všech sorpčních izoterm je patrná také velká hystereze. Hystereze bývá obecně vysvětlována kónickým tvarem pórů [72], který způsobuje rozdílné poloměry vytvářených menisků při adsorpci a desorpci. Je předpokládáno, že čím je menší poloměr křivosti menisku, tím je menší i tlak nad meniskem v porovnání s tlakem nad rovinným povrchem. Proto je rozdíl tlaků při desorpci vyšší, což umožňuje vyšší mikrokapilární vztlakovost při adsorpci (v pórech větších než $0,1 \mu\text{m}$).

Velká hystereze značí, že sádra snadno přijímá vzdušnou vlhkost, kterou při snížení relativní vlhkosti uvolňuje pomalu a dlouho. Podle [72] je velká hystereze způsobená především kapilárními póry (o rozměru $0,001 \mu\text{m}$ až $1000 \mu\text{m}$), kterých mají i zkoušené vzorky velké množství (viz 3.6.5). Pro porovnání je uveden Obr. 40 se sorpčními izotermami vybraných materiálů při teplotě $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Tři z těchto stavebních materiálů dosahují výrazně menší hystereze než zkoumané směsi a dva z nich výrazně méně pohlcují vzdušnou vlhkost (po přepočtu byla maximální naměřená vlhkost sádry bez písku asi $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a u ostatních směsí se pohybovala kolem $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$).



Obr. 40: Sorpční izoterma vybraných materiálů [72]

Pro jednoduché porovnání vlhkosti pohlcené jednotlivými směsmi byla vytvořena Tab. 19., ve které je uvedena pro každou směs maximální hmotnost, které bylo během měření dosaženo. Stejnou barvou jsou vyznačeny směsi se stejně nastaveným časovým krokem a jen ty lze mezi sebou porovnávat. U směsí S1 a S2 značí * kratší časový krok.

Tab. 19: Maximální vlhkost dosažená při měření sorpce a desorpce

Směs	S1*	S1	S2*	S2	S3	S4	S5
Plnivo	-	-	normaliz.	normaliz.	sklářský	drcený	říční
Nárůst hmotnosti [% hm.]	8,231	3,645	0,9301	1,227	2,001	2,587	3,927
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1331	1311	1764	1764	1780	1796	1794
Nárůst hmotnosti [kg/m ³]	109,6	47,8	16,4	21,6	35,6	46,5	70,5

Z porovnání směsí S1* s S5 a směsí S1 a S2 plyne, že sádra bez písku pohlcuje vzdušnou vlhkost snadněji, než sádrová směs s říčním pískem (S5). Je to dáno především větším obsahem sádrové pasty ve směsi bez plniva, protože sádrová pasta pohlcuje vlhkost více, než říční písek.

Dále podle výsledků směs S4 (s drceným kamenivem) pohlcuje vlhkost více než směs S3 (se sklářským pískem) a o mnoho více než směs S2 (s normalizovaným pískem). To lze odůvodnit distribucí pórů, protože obsah pórů do průměru 1 μm na úkor větších pórů způsobuje rychlejší pohlcování vlhkosti.

Pro budoucí měření by bylo vhodné zjišťovat průběh sorpční izotermy jen do relativní vlhkosti 70 % a zvolit spíše delší časový krok. Při vyšší vlhkosti nedochází k ustálení hmotnosti a desorpce je značně ovlivněna časovým krokem při sorpci.

3.6.10 Analýza drsnosti na lomové ploše

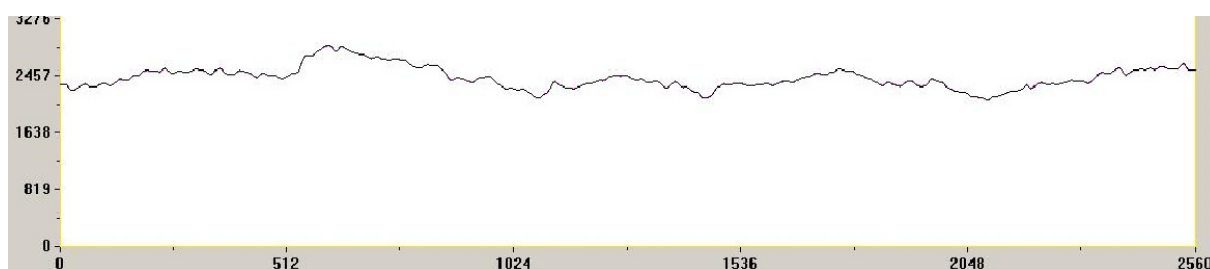
Analýza drsnosti na lomové ploše byla provedena u tří vybraných směsí - S1 (bez plniva), S2 (s normalizovaným pískem) a S4 (s drceným kamenivem). Naměřené hodnoty střední aritmetické výšky drsnosti SRa [μm] jsou v Tab. 20.

Tab. 20: Střední aritmetické výšky drsnosti SRa [μm] lomových ploch trámečků

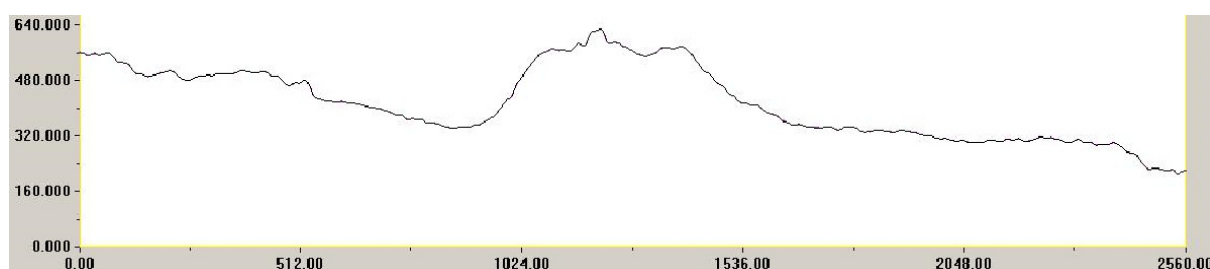
	S1 (bez plniva)	S2 (normaliz.)	S4 (drcený)
SRa [μm]	6 ± 4	14 ± 6	31 ± 23

Podle Tab. 20 se lomová plocha trámečků ze směsi S4 (s drceným kamenivem) jeví jako nejdrsnější. Drsnost lomové plochy je způsobena především protáhlým tvarem zrn drobného kameniva, které bylo do této směsi použito. Hodnotu SRa zvyšují vyčnívající zrna i prohlubně vzniklé vypadnutím zrna při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Zaoblený tvar zrn ve směsi S2 (s normalizovaným pískem) přispěl k nižší drsnosti lomové plochy. Nejnižší drsnost byla naměřena u směsi S1 (bez plniva). Velká směrodatná odchylka u všech směsí je dána jejich velkou drsností a volbou počtu a velikostí vyhodnocovaných ploch.

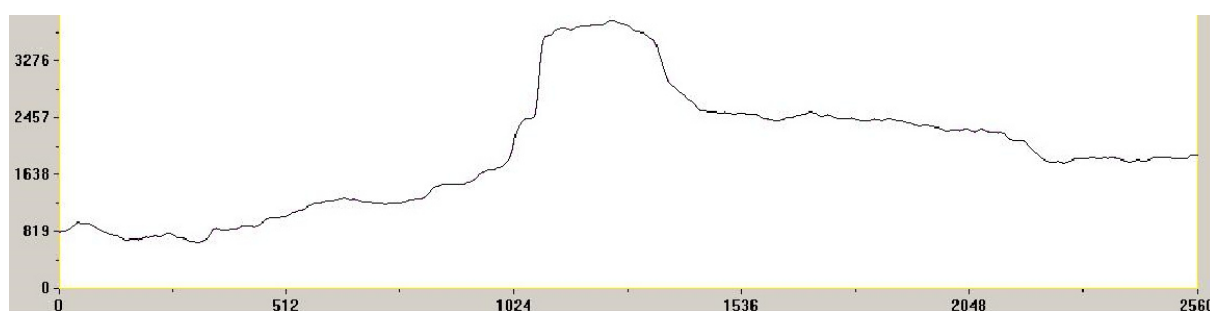
Podle profilů nerovností na Obr. 41, Obr. 42 a Obr. 43 je patrné, že směs S1 (bez plniva) má malé nerovnosti, které se téměř nevzdalují od střední čáry, a proto byla jejich střední aritmetická výška drsnosti SRa nejmenší. Na profilu nerovností směsi S1 si lze povšimnout, že tato směs má však největší množství nerovností, které jsou způsobeny především větším množstvím pórů na zkoumané ploše. Mezi získanými profily od jedné směsi nebyly velké rozdíly, proto je uveden jeden profil pro každou směs.



Obr. 41: Profil nerovností lomové plochy ze směsi S1 (bez plniva)



Obr. 42: Profil nerovností lomové plochy směsi S2 (s normalizovaným pískem)



Obr. 43: Profil nerovností lomové plochy směsi S4 (s drceným kamenivem)

Vztah mezi střední aritmetickou výškou drsnosti *S_{Ra}* zjištěnou na lomových plochách a jinými vlastnostmi směsí není vzhledem k malému počtu zkoušených vzorků zcela prokazatelný. Z tohoto hlediska navíc nelze porovnávat směs bez písku a směsi s pískem, protože u směsi bez písku zjištěná *S_{Ra}* souvisí především s pórovitostí (při daném nastavení programu) - vyšší hodnota *S_{Ra}* poukazuje na vyšší pórovitost, tedy i na větší vodní součinitel, delší počátek tuhnutí, nižší objemovou hmotnost, nižší pevnosti a nižší hodnotu přídržnosti. U směsi s různým plnivem *S_{Ra}* vypovídá především o tvaru zrn, proto vyšší hodnota *S_{Ra}* souvisí např. s vyšší přídržností, vyšší pevností a menším rozlivem.

3.6.11 Chování při vysokých teplotách

3.6.11.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se při vysokých teplotách mění v závislosti jak na změnách objemu tak i hmotnosti. Pokud klesá objem i hmotnost, jako v případě zkoušených trámečků ze směsí S1 (bez plniva) a S2 (s normalizovaným pískem), jsou změny objemové hmotnosti málo vypovídající a je třeba uvést i změny objemu a hmotnosti samostatně (viz. Tab. 21) [66].

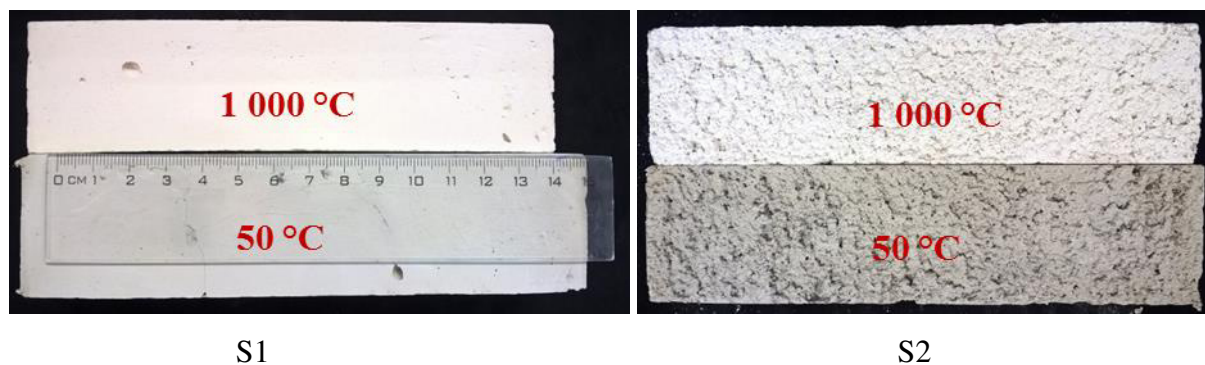
Tab. 21: Objemové a hmotností změny způsobené vysokou teplotou

Teplota	Objemová hmotnost		Objem		Hmotnost	
[°C]	[kg/m ³]		[%]		[%]	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
50	1330	1802	100	100	100	100
100	1160	1745	99	99	86	96
200	1142	1694	98	98	84	92
400	1174	1732	96	96	85	92
500	1182	1697	95	98	84	92
650	1166	1675	94	98	82	91
800	1174	1698	92	101	81	95
1 000	1254	1689	85	96	80	90

Z Tab. 5 je patrné, že hmotnost nejvíce poklesla při 1 000 °C u směsi S1 (bez plniva), a to o 20 % z původní hmotnosti, což je dvakrát více než u směsi S2 (s plnivem). Je to dáno tím, že snížení hmotnosti bylo způsobeno především ztrátou molekul vody ze sádrového pojiva, kterého směs S2 obsahuje méně. Ztráta molekul vody způsobila i pokles objemu, který

po vystavení teplotě 1 000 °C tvořil u směsi S1 (bez plniva) 15 % z původní hodnoty. U směsi S2 (s plnivem) objem poklesl pouze o 4 %, což je dáno obsahem plniva, které vytváří pevnou kostru a pomáhá tak zachovat původní tvar a zabránit smrštění.

Objemové změny jsou ovlivněny nejen ztrátou vody, ale i změnami v krystalické struktuře jednotlivých složek směsí. V případě sádrového pojiva dochází při nárůstu teploty k postupnému uvolňování vody z $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Vzniká $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ a následně různé formy CaSO_4 , které se liší svou krystalickou mřížkou. V případě drobného plniva tvořeného křemičitým pískem (SiO_2) dochází k přeměně nízkoteplotního α – křemene¹ na vysokoteplotní β – křemen při teplotě 573 °C [73, 74]. Tento jev je spojen s malým nárůstem objemu (cca o 1 %) [75]. Další přeměna z β – křemene na β – tridymit nastává při 870 °C, což je spojené s nárůstem objemu o cca 14,5 % [75]. Vlivem těchto přeměn má tedy křemen při teplotě 1 000 °C teoreticky o více než 15 % větší objem než při 20 °C a kompenzuje tak smršťování sádrového pojiva. Změna objemu směsí S1 (bez plniva) a S2 (s plnivem) po zatížení teplotou 1 000 °C je dobře patrná z Obr. 44, kde je porovnání trámeček vystavených teplotám 50 °C a 1 000 °C.

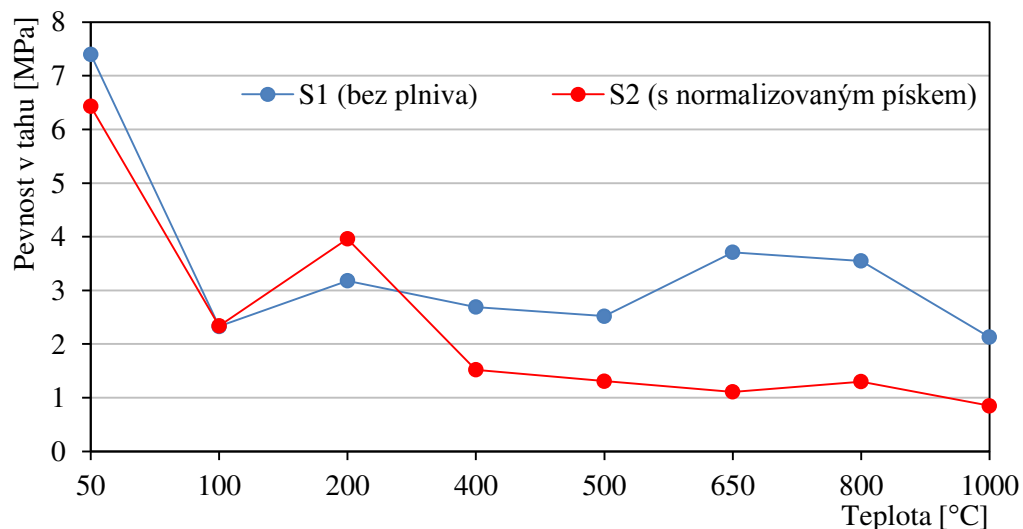


Obr. 44: Trámečky S1 (bez plniva) a trámečky S2 (s drobným plnivem)

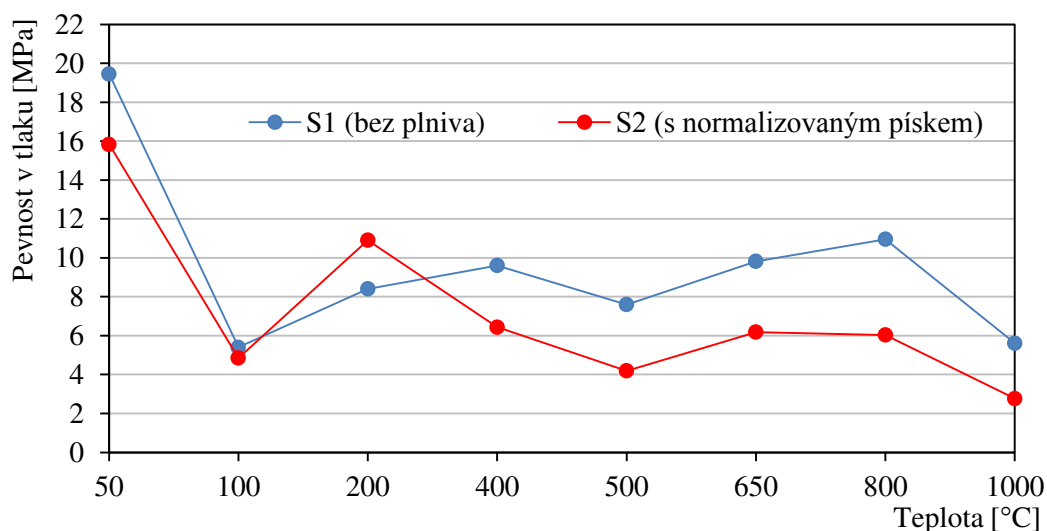
3.6.11.2 Mechanické vlastnosti

Vlivem strukturních změn se při vysokých teplotách mění i mechanické vlastnosti. Vliv vysokých teplot na pevnost směsí S (bez plniva) a S2 (s plnivem) je vyjádřen grafy na Obr. 45 a Obr. 46.

¹ V některých zdrojích (např. [73]) je nízkoteplotní forma značena β – křemen a vysokoteplotní α – křemen. Při 870 °C pak α – křemen přechází na α – tridymit.



Obr. 45: Pevnost v tahu směsí S1 a S2 po zatížení vysokou teplotou



Obr. 46: Pevnost v tlaku směsí S1 a S2 po zatížení vysokou teplotou

Je patrné, že pevnost se zvyšováním teploty neklesá lineárně. Nejrychlejší pokles pevnosti byl u obou zkoušených směsí zaznamenán při teplotě 100 °C, kdy došlo k rozkladu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ na $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ a vodu. Při teplotě 200 °C byl zaznamenán nárůst pevnosti vlivem rozkladu $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ na těžce rozpustný CaSO_4 II – T [16]. Při teplotách nad 200 °C [16] vznikaly další formy CaSO_4 , které se od sebe liší svou krystalickou strukturou a tedy i pevností. Kolísání pevností mezi 300 °C a 600 °C [16] lze vysvětlit přeměnou CaSO_4 II – T na nerozpustný CaSO_4 II – N. Při teplotách nad 600 °C [16] pevnost mírně vzrostla důsledkem vzniku CaSO_4 II – E, tzv. Estrichové sádry, a současně začal rozpad CaSO_4 na CaO a SO_3 [16]. Tento rozpad ve větší míře pokračoval mezi 800 °C a 1 000 °C, což vedlo ke značnému poklesu pevnosti. Pokles pevnosti v této oblasti byl u směsi S2 (s normalizovaným pískem) částečně zapříčiněn i nárůstem objemu SiO_2 při modifikační

přeměně z β – křemene na β – tridymit, při kterém lze předpokládat, že došlo ke značnému narušení sádrového pojiva především v oblasti tranzitní zóny a ke snížení účinnosti přenosu napětí mezi pojivem a plnivem.

Tvar pevnostní křivky na Obr. 45 a na Obr. 46 je podobný u obou směsí. Ztráta pevnosti při 100 °C byla cca 70 % v obou případech. Následoval nárůst pevnosti na 69 % z původní hodnoty u směsi S2 (s normalizovaným pískem) a na 43 % u směsi S1 (bez plniva). Maximální pokles pevnosti byl zaznamenán při 1 000 °C, a to o 71 % u směsi S1 (bez plniva) a o 83 % u směsi S2 (s normalizovaným pískem). Na základě těchto dat má normalizovaný písek pozitivní vliv na pevnost při zvýšených teplotách do 200 °C. Při vyšších teplotách má na pevnost negativní vliv.

3.6.11.3 Vizualní hodnocení

V případě obou směsí došlo vlivem vysokých teplot ke změně barvy (viz. Obr. 47). Před zatížením vysokou teplotou byly vzorky šedé. Při 400 °C došlo k zesvětlení v centrální části průřezu, přičemž okraje průřezu zůstaly šedé. Šedé okraje při teplotě 500 °C téměř zmizely. Při dalším zvýšení teploty vzorky získaly bílo-růžovou barvu.

Během zatížení vysokými teplotami se neobjevily žádné trhliny a vzorky si zachovaly celistvost. Z technického hlediska tedy nejdůležitější vizuálně pozorovatelný rozdíl u vzorků zatížených vysokými teplotami spočívá v objemových změnách zmíněných v 3.6.11.1 (viz Obr. 44).



Obr. 47: Příčný řez směsí S1 (bez plniva, nahoře) a směsí S2 (s normalizovaným pískem, dole) po zatížení teplotami 50 °C (vlevo), 400 °C, 500 °C, 650 °C a 800 °C (vpravo)

3.7 Orientační ceník navržených směsí

Pro představu o ceně sádrové hmoty bez plniva v porovnání s cenou sádrové hmoty s běžným pískem byla vytvořena Tab. 22. V tabulce nejsou zahrnuty směsi S2 a S3, protože písky přidávané do těchto směsí jsou vhodné spíše pro práci v laboratoři a pro některá speciální použití, ale vzhledem k jejich ceně není předpokládáno jejich použití v případné průmyslové výrobě sádrových směsí. Z Tab. 22. je patrné, že přidáním písku jako drobného kameniva do sádrové hmoty vzniká levnější směs.

Tab. 22: Orientační ceník směsí

Směs	1 kg suché směsi	1 m ³ výsledné hmoty
-	[Kč]	[Kč]
S1 (bez plniva)	3,73	3 930
S4 (drcený)	1,41	2 290
S5 (říční)	1,40	2 250

4 Závěr

V této práci byl zjištěn vliv různých druhů kameniva na fyzikálně-mechanické vlastnosti sádrových malt a ty byly porovnány s vlastnostmi sádry bez plniva. Provedené experimenty dokázaly, že přidání drobného kameniva do sádrové hmoty částečně ovlivňuje vzhled, snižuje celkovou pórovitost, zvyšuje objemovou hmotnost a tepelnou vodivost.

Výsledky odpovídají některým poznatkům o drobném kamenivu do betonu, například že je vhodné drcené drobné kamenivo a zrna s drsným povrchem, avšak za cenu výrazně horší zpracovatelnosti. Výsledky dále dokládají, že tvar zrn drobného kameniva ovlivňuje vlastnosti sádrové malty, čímž vyvrací větu z ČSN EN 13139, podle které tvar zrn o velikosti do 4 mm není pro vlastnosti malty významný. Drcené ostrohranné kamenivo s drsným povrchem (v porovnání s kamenivem se zaoblenými zrny a hladkým povrchem) způsobuje:

- horší zpracovatelnost (viz 3.6.3),
- kratší počátek tuhnutí a delší dobu tuhnutí (viz 3.6.3),
- tvorbu menších krystalů v tranzitní zóně, které jsou lépe přichycené k povrchu zrn (viz 3.6.2),
- zvýšení množství pórů o velikosti 0,1 – 1 μm na úkor pórů řádově větších (viz 3.6.5),
- vyšší přídržnost (viz 3.6.6),
- vyšší pevnost v tlaku i tahu za ohybu (viz 3.6.7),
- nižší tepelnou vodivost (viz 3.6.8),
- nižší propustnost pro vodní páru (viz 3.6.8) a
- vyšší drsnost lomové plochy (viz 3.6.10).

Z výsledků jednotlivých měření dále plyne že:

- přidáním písku jako drobného kameniva dochází k nárůstu objemové hmotnosti přibližně o 30 %, ke snížení hodnoty počátku tuhnutí a k úbytku pórů o velikosti 1 až 10 μm (viz 3.6.3, 3.6.4 a 3.6.5),
- přídržnost a pevnost v tlaku i tahu za ohybu sádrové pasty bez plniva a sádry s plnivem je srovnatelná (viz 3.6.6 a 3.6.7),
- přídržnost sádrových malt lze zvýšit vhodnou distribucí jemných částic (viz 3.6.6),

-
- vzdušnou vlhkost pohlcuje snadněji sádrová pasta bez plniva než sádrové malty. Ze zkoušených malt vzdušnou vlhkost pohlcují snadněji malty s vyšším obsahem pórů o velikosti do 1 μm na úkor větších pórů (viz 3.6.9), a že
 - křemičitý písek má pozitivní vliv na pevnost sádry za zvýšených teplot kolem 200 °C. Při teplotách nad 200 °C částečně snižuje pevnost, ale výrazně přispívá k objemové i hmotnostní stálosti (viz 3.6.11).

Sádrová malta má srovnatelné vlastnosti se sádrou bez plniva, avšak její výhodou je nižší cena a také stabilnější chování při požáru. Dále by mohla být využívána např. při výrobě prefabrikovaných dílců, k opravám lokálních poruch stávajících sádrových konstrukcí, jako vyrovnávací nebo podkladní vrstva omítek a jako netradiční finální vrstva omítky.

Literatura

- [1] Gypsum Through the Ages. *GYP SUM ASSOCIATION* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://www.gypsum.org/about/gypsum-101/history-gypsum/>
- [2] Svítidla do předsíně, haly a schodiště. *Svítidla Osvětlení* [online]. 2000 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.svitidla-osvetleni.cz/svitidla-predsinschodiste.html?1=9&2=0&3=0&4=0&5=0&6=0&7=0&8=0&9=0&mincenafiltr=999&maxcenafiltr=3927>
- [3] Manysided B.S. s.r.o.: *Pasívne a nízkoenergetické domy* [online]. Štúrovo, Slovensko [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.manysided.sk/>
- [4] Gold Bond Two-Way Hardwall Gypsum Plaster. *National Gypsum* [online]. Charlotte, North Carolina [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://nationalgypsum.com/products/Product.aspx?ProductID=2395>
- [5] Herrero, S., Mayor P., Hernández-Olivares, F., Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars. *Materials and Design*, **47** (2013) 633–642.
- [6] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 3. vyd. Praha: Jaga Group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [7] ČSN EN13279-1. *Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky - Část 1: Definice a požadavky*. Český normalizační institut, 2009.
- [8] GREGEROVÁ, Miroslava. VZDUŠNÉ MALTY HISTORICKÝCH STAVEB, JEJICH IDENTIFIKACE, PŘÍČINY DEGRADACE A NÁVRH SANACE. In: *Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 1999, Brno 2000*. Katedra mineralogie, petrologie a geochemie, PřF, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 602 00 Brno. Dostupné také z: http://www.sci.muni.cz/gap/casop/r2000_w/aplikovana/gregerova_vzdu%9An%E9.pdf
- [9] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK a Rudolf FRIDRICH. *Omítky*. Brno: ERA group, 2004. Stavíme. ISBN 80-736-6004-0.
- [10] BLAHA, Martin. *Omítky: druhy, provádění, opravy*. 1. vyd. Praha: Grada, 2004. Profi & hobby. ISBN 80-247-0898-1.
- [11] JIRÁSEK, J., VAVRO, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. [online]. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3 [vid. 2015-03-20]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html
- [12] ROVNANÍKOVÁ, P. MATERIÁLY HISTORICKÝCH OMÍTEK. In: *OBNOVA PAMÁTEK 2004 - OMÍTKY HISTORICKÝCH BUDOV: 4. konference s výstavou a exkurzí* [online]. Praha, 23.3. - 24.3.2004. Praha: Masarykova kolej. 2016. [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://www.studioaxis.cz/images/pamatky/rovnanikovapavla.doc>
- [13] KAŠNÍK, F. Výroba sádry v ČSSR a možnost dalšího rozvoje. In: *Sádra ve stavebnictví: celostátní konference: 30.-31. květen 1967 - Brno*. Brno: ČSVTS, 1967. 155 s.
- [14] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-708-0347-9. Dostupné také z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-347-9/pdf/034.pdf

- [15] KREJSOVÁ, Jitka. *Návrh a ověření vlastností lehké sádrové hmoty s kamenným prachem*. ČVUT v Praze, 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, fakulta stavební, katedra materiálového inženýrství a chemie. Vedoucí práce Alena Vimmrová.
- [16] SCHULZE, Walter. *Necementové malty a betony*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-030-0188-9.
- [17] VIMMROVÁ, Alena. *Formulace materiálu na bázi sádrové pěny*. Praha, 2007. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra materiálového inženýrství a chemie. Vedoucí práce Doc. Ing. Luboš Svoboda, CSc.
- [18] VIMMROVÁ, Alena. *Nové materiály na bázi síranu vápenatého*. Praha, 2015. Habilitační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra materiálového inženýrství a chemie.
- [19] ČERNÝ, Robert, Pavla ROVNANÍKOVÁ a Zbyněk KERŠNER. *Vlastnosti modifikované sádry*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3988-7.
- [20] LEIVA, C., C.García ARENAS, L.F. VILCHES, J. VALE, A. GIMENEZ, J.C. BALLESTEROS a C. FERNÁNDEZ-PEREIRA. Use of FGD gypsum in fire resistant panels. *Waste management* [online]. Elsevier Ltd., 2010, , 1123-1129 [cit. 2016-09-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1000070X>
- [21] LEJSEK, Lubomír. Využití sádry ve stavebnictví. In: *Sádra ve stavebnictví: celostátní konference: 30.-31. květen 1967 - Brno*. Brno: ČSVTS, 1967. 155 s.
- [22] YU, Q. L. a H. J. H. BROUWERS. Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: A theoretical and experimental investigation. *Fire and Materials* [online]. 2012, 36(7), 575-589 [cit. 2016-10-12]. DOI: 10.1002/fam.1117. ISSN 03080501. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/fam.1117>
- [23] RAHMANIAN, Ima. *Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum board based systems*. RAHMANIAN, Ima. THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GYPSUM BOARDS AND THEIR INFLUENCES ON FIRE RESISTANCE OF GYPSUM BOARD BASED SYSTEMS [online]. Manchester, UK: The University of Manchester, 2011 [cit. 2016-10-12]. Dostupné z: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:137521&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>. Ph. D. thesis.
- [24] JAVANGULA, Harika. Comparative Studies On Standard and Fire-Rated Gypsum Wallboards. In: *Masters Theses & Specialist* [online]. Western Kentucky University. Paper 1331. 2014 [cit. 2016-10-12]. Dostupné z: <http://digitalcommons.wku.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2334&context=theses>
- [25] Mokrsko - Fire Experiment. *Fakulta stavební ČVUT v Praze: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí* [online]. [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.ocel-drevo.fsv.cvut.cz/fire/thumbnails.php?album=14>
- [26] ČMUGROVÁ, Gabriela. Křest ohněm v Mokrsku. *POŽÁRY.CZ: Ohnisko žhavých zpráv* [online]. 2008 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.pozary.cz/clanek/13714-krest-ohnem-v-mokrsku/>

- [27] TARIQ, Sana. Mortars and concretes: Construction technology. [prezentace]. *Slideshare* [online]. 2010. LinkedIn Corporation. [Vid. 8.10.2016] Dostupné z: http://www.slideshare.net/guest910cb9a/1st-mortars?next_slideshow=1.
- [28] ČSN EN 13043. *Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch*. Český normalizační institut, 2004.
- [29] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Český normalizační institut, 2008.
- [30] ČSN EN 13139. *Kamenivo pro malty*. Český normalizační institut, 2004.
- [31] *BETON: PŘÍRUČKA TECHNOLOGA, SUROVINA - VÝROBA - VLASTNOSTI*. 1 vyd. HEIDELBERGERCEMENT Group, 2010.
- [32] VIMMROVÁ, Alena a Jaroslav VÝBORNÝ. *Building materials 10: materials and testing methods*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2434-2.
- [33] AĪTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. 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.
- [34] PROCHÁZKA, David. *Vytvoření předpokladů hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Brno, 2013. 239 s. Vedoucí dizertační práce: doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [35] *Vysokohodnotné betony pro mosty PK. Technické podmínky* [online]. Praha: Pontex spol s r.o., 2010, 40 str. [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20226.pdf>.
- [36] MEHTA, P. Kumar a Paulo J. M. MONTEIRO. *Concrete: structure, properties, and materials*. 2nd ed. /. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, c1993. ISBN 01-317-5621-4.
- [37] ELSHARIEF, Amir, Menashi D. COHEN, Jan OLEK a Jie YUAN. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, **33**(11), 1837-1849 [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00205-9. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603002059>
- [38] ERFURT, W. *Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit*. Dissertation. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, 2002, 184 SS.
- [39] XIE, Y., CORR, D. J., JIN, F., ZHOU, H., a SHAH, S. P. Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC). *Cement and Concrete Composites* [online]. 2015, **55**, 223-231 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://novintarjome.com/wp-content/uploads/2015/09/Experimental-study-of____dfdas4f5f1fsd2f1f0.pdf
- [40] PING X., BEAUDOIN J.J. a R. BROUSSEAU. Effect of aggregate size on transition zone properties at the Portland cement paste interface. *Cement and Concrete Results*. 1991, **21**(6), 999–1005.
- [41] LI, Zongjin a Wenquan LIANG. *Advanced concrete technology* [online]. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011 [cit. 2016-11-22]. ISBN 978-047-0902-394. Dostupné z: <http://80.site.ebrary.com/dialog.cvut.cz/lib/cvut/reader.action?docID=10446734>

- [42] GE, Yong, Lijuan KONG, Baosheng ZHANG a Jie YUAN. Effect of lightweight aggregate pre-wetting on microstructure and permeability of mixed aggregate concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* [online]. 2009, **24**(5), 838-842 [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.1007/s11595-009-5838-2. ISSN 1000-2413. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11595-009-5838-2>
- [43] KONG, Yaning, Peiming WANG, Shuhua LIU, Guorong ZHAO a Yu PENG. SEM Analysis of the Interfacial Transition Zone between Cement-Glass Powder Paste and Aggregate of Mortar under Microwave Curing. *Materials* [online]. 2016, **9**(9). [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.3390/ma9090733. ISBN 10.3390/ma9090733. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/9/733>
- [44] ZMEŠKAL, Oldřich. *Optické mikroskopy* [online]. Fakulta chemická, VUT v Brně, 2013 [vid. 2016-06-01]. Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/04_opticke_mikroskopy.pdf
- [45] KUBÍNEK, Roman, Klára ŠAFÁŘOVÁ a Milan VŮJTEK. *Elektronová mikroskopie* [online]. Katedra experimentální fyziky a centrum výzkumu nanomateriálů, Univerzita Palackého v Olomouci, 2011 [vid. 2016-05]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>. Skriptum.
- [46] ULBRICH, Pavel. *Elektronová mikroskopie* [online]. VŠCHT v Praze, 2009 [vid. 2016-06-02]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf. Prezentace. VŠCHT v Praze.
- [47] Úloha 3: Prvková analýza EDS. *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2016-10-25]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/uloha-3-prvkova-analyza-eds>
- [48] Rozvoj přístrojového vybavení experimentálních pracovišť FSv a KÚ – pořízení XRF spektrometru: Rozvojový projekt ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR. *Kloknerův Ústav ČVUT* [online]. Praha [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <http://web.cvut.cz/ki/index.php?id=41>
- [49] XRF Technology. *ThermoFisher SCIENTIFIC* [online]. Thermo Fisher Scientific [cit. 2016-10-29]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/elemental-analysis-information/xrf-technology.html>
- [50] MÁŠILKO, Jiří. Rentgenová difrakční analýza na práškových vzorcích. *CHEMPOINT: Vědci pro průmysl a praxi* [online]. Fakulta chemická, VUT v Brně [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-difrakcni-analyza-na-praskovych-vzorcich>
- [51] ČSN EN 13454-2+A1 *Pojiva, kompozitní pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi pro podlahové potěry ze síranu vápenatého – Část 2: Zkušební metody*. ICS: 91.100.10; 91.100.50. Praha: ÚNMZ, únor 2008.
- [52] ČSN EN 13279-2 *Sádrová pojiva a sádrové malty pro vnitřní omítky – Část 2: Zkušební metody*. ICS: 91.100.10. Český normalizační institut, Červen 2005.
- [53] PAVLÍKOVÁ, Milena, Zbyšek PAVLÍK a Jiří HOŠEK. *Materiálové inženýrství I. 2.přeprec. vyd.* V Praze: České vysoké učení technické, 2011. 283 s. ISBN 978-80-01-04932-7.

- [54] ČSN EN 1015-12 *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 12: Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu*. ICS 91.100.10. Český normalizační institut, říjen 2000.
- [55] SLANINA, Petr. *Difúzní vlastnosti materiálů z pohledu nových tepelně technických norem* [online]. FSv, ČVUT v Praze, 2005 [cit. 2016-09-12]. Dostupné z: http://slanina.cz/publikace/files/14_slanina_difuzni_vlastnosti_materialu_z_pohledu_novy_ch_tepelne_tech_nicky_ch_norem.pdf
- [56] PAVLÍK, Zbyšek, Igor MEDVEĎ, Jaromír ŽUMÁR, Milena PAVLÍKOVÁ a Robert ČERNÝ. Analýza adsorpce plynné vlhkosti v porézních stavebních materiálech. *Stavební obzor* [online]. **21**(01/2013), 1-5 [cit. 2016-10-06]. Dostupné z: <http://www.profesis.cz/files/dokumpdf/sobzor/so012013pdf.pdf>
- [57] *DVS Advantage: Návod k obsluze*. Pragolab, 2004.
- [58] PAVLÍK, Zbyšek, Jaromír ŽUMÁR, Igor MEDVED a Robert ČERNÝ. Water Vapor Adsorption in Porous Building Materials: Experimental Measurement and Theoretical Analysis. *Transport in Porous Media* [online]. 2012, **91**(3), 939-954 [cit. 2016-10-05]. DOI: 10.1007/s11242-011-9884-9. ISSN 0169-3913. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11242-011-9884-9>
- [59] BRUNAUER, Stephen, P. H. EMMET a Edward TELLER. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1938, **60**(2), 309-319 [cit. 2016-10-18]. DOI: 10.1021/ja01269a023. Dostupné z: https://zumbuhllab.unibas.ch/pdf/refs/BET_JACS_1938.pdf
- [60] Hansen, Kurt Kielsgaard. *Sorption isotherms: a catalogue*. Diss. Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Structural Engineering and Materials Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer, 1986.
- [61] TYKAL, Miroslav. Normalizace struktury povrchu, současný stav a trendy vývoje. *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. VUT v Brně, **srpen 2005** [cit. 2016-10-26]. ISSN 1801-5352. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/41_Tykal_TNK7.pdf
- [62] NÁVODY K LABORATORNÍM ÚLOHÁM: Topografická analýza lomových povrchů. In: *Konfokální mikroskopie* [online]. Ústav fyziky FAST VUT [cit. 2016-10-18]. Dostupné z: <http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/Návody%20k%20laboratorním%20úlohám%20-%20mikroskopie.pdf>
- [63] Drsnost povrchu: Parametry drsnosti povrchu dle DIN EN ISO. HOMMEL CS s.r.o. [online]. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf>
- [64] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [65] MAREK, Martin. *TECHNICKÁ DOKUMENTACE: Drsnost povrchu* [online]. 2006 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf. Prezentace. VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

- [66] VOBORSKÁ, Jitka, DOLEŽELOVÁ, Magdaléna a Alena VIMMROVÁ. Effect of high temperatures on gypsum paste and mortar. In: *THERMOPHYSICS 2016: 21ST INTERNATIONAL MEETING*. Terchová, 12.10.2016 - 14.10.2016. Melville, NY: AIP Publishing, APL, the American Institute of Physics. 2016, s. 040017-1-040017-4. AIP Conference Proceeding. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-1410-5.
- [67] SVOBODA, Luboš. DDtest. *Fakulta stavební ČVUT v Praze: Katedra stavebních hmot K 123* [online]. 2009 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodad/DDtest/>
- [68] GYPSTREND, s.r.o. [online]. *Profil společnosti*. [vid. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.gypstrend.cz/?clanek=1>
- [69] DOLEŽELOVÁ, Magdaléna, KREJSOVÁ, Jitka a Alena VIMMROVÁ. Gypsum mortars with different types of aggregates: Design and properties. In: *Special Concrete and Composites 2016*. Bystřice nad Pernštejnem, Lísek, 13.10.2016 - 14.10.2016. Curich: Trans Tech Publications. 2017, s. 337-342. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3.
- [70] VOBORSKÁ, Jitka, DOLEŽELOVÁ, Magdaléna a Alena VIMMROVÁ. NÁVRH A ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNOSTÍ SÁDROVÉ MALTY S RŮZNÝMI DRUHY KAMENIVA. In: *CONSTRUMAT 2016: Sborník příspěvků z XXII. mezinárodní konference o stavebních materiálech*. 2016. Stará Živohošť, 01.06.2016 - 03.06.2016. Praha: ČVUT v Praze. 2016, ISBN 978-80-01-05958-6.
- [71] ČSN EN 933-2 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 2: Stanovení zrnitosti - Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů*. ICS 91.100.20. Český normalizační institut, duben 1997.
- [72] PERNICOVÁ, Radka a Milena PAVLÍKOVÁ. Vliv teploty na sorpční vlastnosti materiálů historických budov. *Stavební obzor* [online]. 2009, **18**(6/2009), 168-172 [cit. 2016-11-24]. ISSN 1210-4027. Dostupné z: <http://www.profesis.cz/files/dokumpdf/sobzor/so062009.pdf>
- [73] GREGEROVÁ, Miroslava, Pavel POSPÍŠIL a Miloš SUK. *TECHNOLITHOLOGY* [online]. Brno, 2004 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://petrol.sci.muni.cz/Technolithologie/skripta/anglicky/Technolithology-skripta.htm>
- [74] The Silica Group: Overview of Silica Polymorphs. *The Quartz Page* [online]. Hamburg, 2005 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: http://www.quartzpage.de/gen_mod.html
- [75] CARDARELLI, François. *Materials handbook a concise desktop reference*. 2nd ed. London: Springer, 2008. ISBN 18-462-8669-7.

Seznam příloh

- Příloha 1: Technický list - šedé sádrové pojivo
- Příloha 2: Certifikát – normalizovaný písek (P2)
- Příloha 3: Zrnitost normalizovaného písku (P2)
- Příloha 4: Vlastnosti technických písků – Sklopísek Střeleč (P3)
- Příloha 5: Prohlášení o vlastnostech – přírodní drcené kamenivo, směs hornin (P4)
- Příloha 6: Prohlášení o vlastnostech – přírodní těžené kamenivo, hornina šterkopísek (P5)
- Příloha 7: Protokol výsledků z XRF analýzy – sádra
- Příloha 8: Protokol z XRD analýzy – sádra
- Příloha 9: Výsledky z XRD analýzy – sádra
- Příloha 10: Výsledky z XRD analýzy – normalizovaný písek (P2)
- Příloha 11: Výsledky z XRD analýzy – Sklopísek Střeleč (P3)
- Příloha 12: Výsledky z XRD analýzy – drcené kamenivo (P4)
- Příloha 13: Výsledky z XRD analýzy – přírodní těžené kamenivo (P5)

Seznam obrázků

Obr. 1: Izolační schopnost sádry při požáru, převzato z [20].....	18
Obr. 2: Mikrostruktura sádrové desky po zatížení 80 °C a 120 °C, převzato z [22].....	19
Obr. 3: Stěna ze sádrových bloků před požární zkouškou [25].....	20
Obr. 4: Detail stěny ze sádrových bloků po požární zkoušce [26].....	20
Obr. 5: Mikrostruktura tranzitní zóny v betonu, převzato z [36]	24
Obr. 6: Tranzitní zón a v betonu s vysokým (a) a nízkým vodním součinitelem (b) [38] ..	25
Obr. 7: Tvar pracovního diagram betonu, kameniva a cementu, převzato z [41]	25
Obr. 8: Zjišťování přídržnosti.....	33
Obr. 9: Primární nefiltrovaný profil P a profily vlnitosti W a drsnosti R, převzato z [63] .	38
Obr. 10: Grafické vyjádření střední aritmetické drsnosti R_a [65]	39
Obr. 11: Výstup z programu LEXT_OLS: Profil nerovností	40
Obr. 12: Typická zrna drobného kameniva (zleva: P2, P3, P4, P5) viz také [68].....	43
Obr. 13: Drobné kamenivo (zleva: P2, P3, P4, P5).....	43
Obr. 14: Křivka zrnitosti drobného kameniva	46
Obr. 15: Distribuce jemných částic plniv P3 (sklářský) a P5 (říční).....	47
Obr. 16: Povrch zrn drobného kameniva P5, P4, P2 a P3	48
Obr. 17: Struktura zatvrdlé sádry (S1).....	49
Obr. 18: Tranzitní zóna směsi S2 (s normalizovaným pískem)	49
Obr. 19: Tranzitní zóna směsi S3 (se sklářským pískem)	50
Obr. 20: Tranzitní zóna směsi S4 (s drceným kamenivem)	50
Obr. 21: Tranzitní zóna směsi S5 (s říčním pískem)	51
Obr. 22: Závislost počátku a konce tuhnutí na rozlivu.....	52
Obr. 23: Chování čerstvé malty S2 s normalizovaným pískem a sádry bez plniva S1	53
Obr. 24: Distribuce pórů vztažená ke hmotnosti pojiva a plniva [69].....	54
Obr. 25: Distribuce pórů vztažená ke hmotnosti sádrového pojiva.....	56
Obr. 26: Vliv distribuce pórů na pevnosti sádrových malt.....	59
Obr. 27: Přídržnost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku	60
Obr. 28: Faktor difúzního odporu směsí.....	61
Obr. 29: Faktor difúzního odporu v závislosti na velikosti krystalů v tranzitní zóně	62
Obr. 30: Součinitel tepelné vodivosti v závislosti na velikosti krystalů v tranzitní zóně....	62
Obr. 31: DVS: Průběh měření 1, směs S1 (bez plniva).....	63

Obr. 32: DVS: Průběh měření 2, směs S1 (bez plniva).....	64
Obr. 33: DVS: Průběh měření 1, směs S2 (s normalizovaným pískem)	64
Obr. 34: DVS: Průběh měření 2, směs S2 (s normalizovaným pískem)	64
Obr. 35: DVS: Sorpční izoterma směsi S1 (bez plniva).....	65
Obr. 36: DVS: Sorpční izoterma směsi S2 (s normalizovaným pískem)	65
Obr. 37: DVS: Sorpční izoterma směsi S3 (se sklářským pískem)	66
Obr. 38: DVS: Sorpční izoterma směsi S4 (s drceným kamenivem)	66
Obr. 39: DVS: Sorpční izoterma směsi S5 (s říčním pískem).....	66
Obr. 40: Sorpční izoterma vybraných materiálů [72].....	67
Obr. 41: Profil nerovností lomové plochy ze směsi S1 (bez plniva).....	69
Obr. 42: Profil nerovností lomové plochy směsi S2 (s normalizovaným pískem).....	69
Obr. 43: Profil nerovností lomové plochy směsi S4 (s drceným kamenivem).....	69
Obr. 44: Trámečky S1 (bez plniva) a trámečky S2 (s drobným plnivem).....	71
Obr. 45: Pevnost v tahu směsí S1 a S2 po zatížení vysokou teplotou	72
Obr. 46: Pevnost v tlaku směsí S1 a S2 po zatížení vysokou teplotou.....	72
Obr. 47: Příčný řez směsí S1 a S2 po zatížení teplotami.....	73

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlastnosti sádry	17
Tab. 2: Strukturální přeměny sádry při teplotách nad 100 °C [6]	18
Tab. 3: Dělení kameniva podle velikosti zrn [31]	23
Tab. 4: Vlastnosti šedé stavební sádry udávané výrobcem	41
Tab. 5: Chemické složení šedé stavební sádry udávané výrobcem	42
Tab. 6: Oxidové složení šedé stavební sádry zjištěné XRF analýzou	42
Tab. 7: Mineralogické složení šedé stavební sádry zjištěné metodou XRD	42
Tab. 8: Přehled drobného kameniva	43
Tab. 9: Mineralogické složení kameniva zjištěné metodou XRD	43
Tab. 10: Dávkování kameniva na stejný objem [68]	44
Tab. 11: Složení směsí [68]	45
Tab. 12: Hodnocení tranzitní zóny	51
Tab. 13: Hodnoty rozlití a počátky tuhnutí směsí	52
Tab. 14: Objemové hmotnosti směsí	53
Tab. 15: Pórovitost vztažená k sádrovému pojivu	55
Tab. 16: Přídržnost a způsoby porušení	57
Tab. 17: Pevnosti směsí ve vztahu k distribuci pórů	58
Tab. 18: Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita směsí	61
Tab. 19: Maximální vlhkost dosažená při měření sorpce a desorpce	68
Tab. 20: Střední aritmetické výšky drsnosti SRa [μm] lomových ploch trámečků	68
Tab. 21: Objemové a hmotností změny způsobené vysokou teplotou	70
Tab. 22: Orientační ceník směsí	74



GYPSTREND s.r.o.

Sádrovcové doly, 747 27 KOBEŘICE 790, www.gypstrend.cz
 tel: 553 687 200, 211 fax: 553 657 126, GSM: 602 527 887, e-mail: info@gypstrend.cz

OÚ-TS7/1

Technický list

Parametry šedého sádrového pojiva třídy A

Objemová hmotnost – 670 – 860 kg/m²

Vodní koeficient – 0,7 – 0,85 l/kg

Zůstatek na síť 0,2 mm – 0,6 – 6%

Doba tuhnutí: počátek ≥ 6 minut

konec ≤ 30 minut

Pevnost po 2 hodinách – 2,0 – 3,5 Mpa

Sádrová pojiva musí být při skladování chráněna před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75%). Za těchto podmínek je doba skladování sádrových pojiv 60 dnů od data expedice z výrobního závodu GYPSTREND s. r. o.

Výše uvedené parametry splňují požadavky ČSN EN 13279-2

Chemické složení

CaSO ₄ · 1/2H ₂ O	80 – 95%
ztráta žháním	4 – 6 %
SiO ₂ + nerozpustný zbytek	8 – 12%
CaSO ₄	0 – 0,5%
SO ₃	37 – 44%
CaO	24 – 36%
MgO	0,2 – 1%
Seskvioxidy (Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃).....	1 – 2,5%

Těžké kovy

Hg	3 ± 0,4 µg/g
Cr	< 5,4 µg/g
Ni	12,9 ± 0,8 µg/g
As	1,3 ± 0,2 µg/g
Cd	0,5 ± 0,1 µg/g
Pb	9,3 ± 0,8 µg/g

Hmotnostní aktivita ²²⁶Ra – max. 80 Bq/kg, průměrně 10 ± 4 Bq/kg



TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.

Technical and Test Institute for Construction Prague

Akreditovaná zkušební laboratoř, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznamovaný subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgán, Inspekční orgán / Accredited Testing Laboratory, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Body, Inspection Body, Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9 - Prosek, Czech Republic

Certifikační orgán
Pobočka 0400 – Teplice
vydává

CERTIFIKÁT

č. 040 – 047325

na produkt:

Normalizovaný písek

typ/varianta : CEN, ČSN EN 196-1

žadatel:

Filtrační písky, spol. s r. o.

IČ: 25 40 90 00
Adresa: Chlum 117, 472 01 Doksy
Výrobní: **Chlum**
IČ: 25 40 90 00
Adresa: **Chlum 117, 472 01 Doksy**
Zakázka: Z040 14 0264

Certifikační schéma 1a podle ČSN EN ISO/IEC 17067 zahrnující zkoušení vzorků produktu.

Certifikační orgán tímto certifikátem osvědčuje, že:

- u vzorku předmětného produktu zjistil shodu jeho vlastností s požadavky technické specifikace:

ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti

- výrobek odpovídá požadavkům technického předpisu - Vyhláška č. 389/2012 Sb., kterou se mění vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.,

Tento certifikát je vydán na základě protokolu o výsledku certifikace produktu č. 040 – 047324 ze dne 1. prosince 2014 vydaného TZÚS Praha, s. p. - pobočkou Teplice, který se předává žadateli. Protokol obsahuje závěry zjišťování a podmínky platnosti certifikátu.

Certifikát má 1 přílohu (1 strana), která je nedílnou součástí certifikátu.

Teplice, 1. prosince 2014

Platnost certifikátu do: **31. prosince 2017**



Ing. Pavel Rubáš, Ph.D.
zástupce vedoucího certifikačního orgánu



Příloha k certifikátu č. 040 – 047325

Podmínky platnosti a používání certifikátu:

1. Certifikát shody se musí používat pouze pro účely, pro které byl vydán.
2. Tento certifikát nenahrazuje dokumenty vydávané autorizovanou osobou podle nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ani oznamovým subjektem podle nařízení EP a Rady (EU) č. 305/2011.
3. Certifikovaný produkt musí být trvale v souladu s technickou specifikací.
4. Držitel certifikátu je povinen:
 - a) informovat certifikační orgán o všech změnách: modifikaci produktu nebo výrobního procesu, materiálových změnách, změnách systému řízení výroby, které mají vliv na shodu certifikovaného produktu;
 - b) oznamovat certifikačnímu orgánu změny ve vlastnictví, struktuře nebo vedení;
 - c) vést záznamy o všech stížnostech týkajících se neshody certifikovaného produktu s požadavky příslušné normy;
 - d) přijmout vhodná opatření na odstranění neshody a přijatá opatření dokumentovat;
 - e) na požádání předložit certifikačnímu orgánu výše uvedené záznamy o stížnostech;
5. Certifikační orgán provádí opakované hodnocení produktu v případě, že dojde ke změnám ovlivňujícím vlastnosti produktu, ke změně technických specifikací nebo k významným změnám ve vlastnictví, struktuře nebo vedení organizace.
6. Proti tomuto certifikátu má žadatel právo podat odvolání na TZÚS Praha, s.p., úsek řízení jakosti, do 15 dnů ode dne doručení tohoto certifikátu.

Tato příloha je nedílnou součástí certifikátu č. 040 – 047325.

Teplice, 1. prosince 2014



Ing. Pavel Rubáš, Ph.D.
zástupce vedoucího certifikačního orgánu

Zrnitost písku PG (CEN)**Výsledný produkt CEN (PG)**

síta [mm]	střed tolerance	min.	max.
2	0	0	0
1,6	7±5	2	12
1	33±5	28	38
0,5	67±5	62	72
0,16	87±5	82	92
0,08	99±1	98	100
<0,08	100	100	100

PG I

síta	nadsítné min.	nadsítné max.
0,5	0	16
0,16	56	76
0,08	94	100
<0,08	100	100

PG II

síta	nadsítné min.	nadsítné max.
1	0	14
0,5	86	100
<0,5	100	100

PG III

síta	nadsítné min.	nadsítné max.
2	0	0
1,6	6	36
1	84	100
<1	100	100

TECHNICKÉ PÍSKY

Písky s extrémně vysokým obsahem SiO_2 jsou vynikající surovinou ve vodárenství k filtrování pitné vody a technologických vod, pro nejrůznější použití ve strojírenství, pro technologii přesného lití, ve stavebnictví jako plnivo do průmyslových podlah, na tryskání betonových a ocelových konstrukcí, na zásyp umělých sportovních trávníků apod. Technický písek s malým obsahem Fe_2O_3 je vynikající surovinou v elektrotechnickém průmyslu jako hasivo do pojistek vysokého napětí, jako zásypová a izolační hmota v elektrických topných tělesech a v dalších oborech.

Písky se dodávají sušené, volně ložené a balené, pro nakládku na silniční nebo železniční dopravní prostředky.

ZRNITOSTNÍ DATA A VLASTNOSTI TÝKAJÍCÍ SE VELIKOSTI ČÁSTIC

	ST 01/06	ST 02/06	ST 03/08	ST 05/10	ST 06/12	STF 06/12	ST 10/40	Metody
Velikost středního zrna (d50)	0,35	0,35	0,55	0,72	0,92	0,78	1,98	mm sítování
AFS	36	32	23	17	15	17	5	sítování
sypaná hmotnost	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	kg/l
> 4000 μm					4	2	0	% sítování
> 1250 μm	0	0	0	0			99	% sítování
> 1000 μm			5,5	5				% sítování
> 800 μm	7,5	0,5			93			% sítování
> 630 μm				94		96		% sítování
> 500 μm			93				1	%
> 315 μm	82	98,5						% sítování
> 200 μm					3			% sítování
> 100 μm	10	1	1,5	1		2		% sítování
< 100 μm	0,5							% sítování

CHEMICKÉ ANALÝZY (RFA) %

	ST 01/06	ST 02/06	ST 03/08	ST 05/10	ST 06/12	STF 06/12	ST 10/40
SiO_2	99,2	99,4	99,4	99,3	99,2	99,3	99,2
Fe_2O_3	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03

FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKA

hustota (g/ml)	2,65	vlhkost (%)	0,2 max
tvrdost, Mohs	7	pH	7,2
ztráta žíháním (%)	0,1 - 0,3		

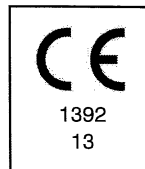
Křemenný písek ze Střelče je upravená přírodní surovina. Výše uvedené informace jsou založeny na středních hodnotách. Data by měla být považována pouze za indikativní. Hrubší a jemnější podíly jsou ve stopových množstvích možné. Uživateli přísluší, aby nejprve otestoval a posoudil vhodnost použití pro svůj účel. O případných tolerancích výše uvedených hodnot výrobků je možné jednat.

Prodej a dodávání je vždy na základě sjednaných obchodních podmínek a podle příslušné podnikové normy nebo kvalitativní dohody.

Datum revize: 1.7.2015

Prohlášení o vlastnostech č. DoP-11-15046-411

podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011



- Identifikační kód výrobku: **411 ZBRASLAV 0/4**
- Druh stavebního výrobku: **Přírodní drcené kamenivo, směs hornin**
- Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku:
Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch
Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace

4. Výrobce: **KÁMEN Zbraslav, a.s., Žitavského 1178, 156 00, Praha 5, IČ: 01820460, tel.: +420 257 922 231**

- Jméno a kontaktní adresa zplnomocněného zástupce: -
- Systém posuzování a ověřování stálostí vlastností: **Systém 2+**
- Oznámený subjekt: **Zkušebna kamene a kameniva, s.r.o., oznámený subjekt č. 1392**
provedl počáteční inspekci ve výrobním závodě a řízení výroby, provádí průběžný dozor, posuzování a hodnocení řízení výroby, a vydal Osvědčení o shodě řízení výroby (Certifikát SRV) č.: **1392-CPR-495** ze dne 9.5.2014.
- Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti (vztahující se na použití podle):		Harmonizované technické specifikace
	EN 13043	EN 13242	
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost			U základních charakteristik a vlastností uvedených ve sloupci: EN 13043 platí odkaz na: EN 13043:2002 EN 13242 platí odkaz na: EN 13242:2002+A1:2007
- Frakce kameniva	0/4	0/4	
- Zrnitost	G _F 85	G _F 85	
- Tolerance pro zrnitost DK a směsi	G _{TC} 10	G _{TC} 10	
- Propad na středním síti HK s D/d > 2	-	-	
- Propad na středním síti HK s D/d ≥ 2	NPD	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – tvarový index	NPD	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – index plochosti	NPD	NPD	
- Procentní podíl drcených a lámaných zrn v HK	NPD	NPD	
- Objemová hmotnost	2,716 Mg/m ³	2,716 Mg/m ³	
Čistota			
- Obsah schránek živočichů v HK	-	-	
- Obsah jemných částic	f ₁₀	f ₁₀	
- Kvalita jemných částic	MB _F 10	SE ₃₅	
Afinita mezi hr. kamenivem s asfaltovým pojivem			
- Průměrný stupeň obalení - asfalt 50/70, 70/100	NPD	-	
Odolnost proti drcení			
- Odolnost proti drcení metodou LA	NPD	NPD	
- Odolnost proti drcení rázem	NPD	NPD	
Odolnost proti otěru/ohladitelnosti/obrusu			
- Odolnost proti otěru HK (mikro-Deval)	NPD	NPD	
- Odolnost proti ohladitelnosti	NPD	-	
- Odolnost proti povrchovému obrusu	NPD	-	
- Odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty	NPD	-	
Odolnost vůči tepelným šokům	NPD	-	
Složky/obsah			
- Složky hrubého recyklovaného kameniva	-	NPD	
- Chloridy	-	-	
- Sířany rozpustné v kyselině	-	AS _{0,2}	
- Celková síra	-	S ₁	
- Obsah vodou rozpustných síranů v recykl. kamenivu	-	NPD	
- Potenciální přítomnost humusu	-	Vyhovuje	
- Obsah lehkých znečišťujících částic	m _{LPC} 0,1	-	
- Obsah oxidu uhličitého v drobném kamenivu	-	-	
Objemová stálost			
- Objemová stálost-smršťování vysycháním	-	-	
- Rozpad křemičitanu vápenatého ve VCHVS	NPD	NPD	
- Rozpad železa ve VCHVS	NPD	NPD	
- Objemová stálost kameniva z ocelářské strusky	NPD	NPD	
Nasákavost	-	WA ₂₄ 1	
Nebezpečné látky			
- Emise radioaktivity	Ra 226 ≤ 50 Bq/kg, Index ≤ 1,0		
- Uvolňování těžkých kovů a polyaromatic. uhlovodíků	NPD	NPD	
- Uvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	NPD	
Trvanlivost proti zmrazování a rozmrazování			
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	NPD	NPD	
- Zkouška síranem hořečnatým	NPD	NPD	
Odolnost proti rozpadavosti čediče	NPD	NPD	
Trvanlivost proti alkalicko-křemičité reakci			
- Odolnost proti alkalicko-křemičité reakci	-	-	

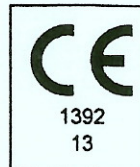
9. Vlastnost výrobku uvedeného v bodě 1 a 2 je ve shodě s vlastností uvedenou v bodě 8.

Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4. Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

V Praze 2.3.2015	Jméno a funkce	Ing. Karel Malý, vedoucí laboratoře	Podpis	KÁMEN Zbraslav, a.s.
------------------	----------------	-------------------------------------	--------	-----------------------------

Žitavského 1178, 156 00 Praha 5
IČ: 01820460 (2)

Prohlášení o vlastnostech č. 01/CPR/2013
podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011



- Identifikační kód výrobku: **BOREK 0/4**
- Druh stavebního výrobku: **Přírodní těžené kamenivo, hornina štěrkopísek**
- Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku:
Kamenivo pro přípravu betonu pro pozemní stavby, pozemní komunikace a jiné inženýrské stavby
Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch
Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace
- Výrobce: **TAPAS BOREK, s.r.o., Borek 74, PO BOX 16, 250 02 p. Stará Boleslav, okres Praha-východ, IČ: 49 54 90 49, tel.: ++420 602 121 057, 326 911 092, e-mail: tapas@cmail.cz**
- Jméno a kontaktní adresa zplnomocněného zástupce: -
- Systém posuzování a ověřování stálosti vlastností: **Systém 2+**
- Oznámený subjekt: **Zkušebna kamene a kameniva, s.r.o., oznámený subjekt č. 1392**
provedl počáteční inspekci ve výrobním závodě a řízení výroby, provádí průběžný dozor, posuzování a hodnocení řízení výroby, a vydal Osvědčení o shodě řízení výroby (Certifikát SRV) č.: 1392-CPD-118 ze dne 31.5.2004.
- Deklarované vlastnosti:

Základní charakteristiky	Vlastnosti (vztahující se na použití podle):			Harmonizované technické specifikace
	EN 12620	EN 13043	EN 13242	
Tvar zrn, frakce a objemová hmotnost				<p>U základních charakteristik a vlastností uvedených ve sloupci:</p> <p>EN 12620 platí odkaz na: EN 12620:2002+A1:2008</p> <p>EN 13043 platí odkaz na: EN 13043:2002</p> <p>EN 13242 platí odkaz na: EN 13242:2002+A1:2007</p> <p><i>Poznámka: Pokud se základní charakteristika nebo vlastnost nevztahuje k harmonizované technické specifikaci, řádek je v příslušném sloupci proškrtnut.</i></p>
- Frakce kameniva	0/4	0/4	0/4	
- Zrnitost	G _F 85	G _A 85	G _F 85	
- Tolerance pro zrnitost DK a směsi	G _T 15	G _{Tc} 10	G _{Tf} 10	
- Propad na středním síti HK s D/d > 2	NPD	-	-	
- Propad na středním síti HK s D/d ≥ 2	-	NPD	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – tvarový index	NPD	NPD	NPD	
- Tvar zrn hrubého kameniva – index plochosti	NPD	NPD	NPD	
- Procentní podíl drcených a lámaných zrn v HK	-	NPD	NPD	
- Objemová hmotnost	2,593 Mg/m ³	2,593 Mg/m ³	2,593 Mg/m ³	
Čistota				
- Obsah schránek živočichů v HK	NPD	-	-	
- Obsah jemných částic	f ₃	f ₃	f ₃	
- Kvalita jemných částic	NPD	NPD	NPD	
Afinita mezi hr. kamenivem s asfaltovým pojivem				
- Průměrný stupeň obalení - asfalt 50/70, 70/100	-	NPD	-	
Odolnost proti drcení				
- Odolnost proti drcení metodou LA	NPD	NPD	NPD	
- Odolnost proti drcení rázem	NPD	NPD	NPD	
Odolnost proti otěru/ohladitelnosti/obrusu				
- Odolnost proti otěru HK (mikro-Deval)	NPD	NPD	NPD	
- Odolnost proti ohladitelnosti	NPD	NPD	-	
- Odolnost proti povrchovému obrusu	NPD	NPD	-	
- Odolnost proti obrusu pneumatikami s hroty	NPD	NPD	-	
Odolnost vůči tepelným šokům	-	NPD	-	
Složky/Obsah				
- Složky hrubého recyklovaného kameniva	NPD	-	NPD	
- Chloridy	≤ 0,01 % hm.	-	-	
- Síraný rozpustné v kyselině	AS _{0,2}	-	AS _{0,2}	
- Celková síra	Vyhovuje	-	S ₁	
- Obsah vodou rozpustných síranů v recykl. kamenivu	NPD	-	NPD	
- Potenciální přítomnost humusu	Vyhovuje	-	Vyhovuje	
- Obsah lehkých znečišťujících částic	≤ 0,25 % hm.	m _{LPc} 0,5	-	
- Obsah oxidu uhličitého v drobném kamenivu	NPD	-	-	
Objemová stálost				
- Objemová stálost-smršťování vysycháním	NPD	-	-	
- Rozpad křemičitanu vápenatého ve VCHVS	NPD	NPD	NPD	
- Rozpad železa ve VCHVS	NPD	NPD	NPD	
- Objemová stálost kameniva z ocelářské strusky	-	NPD	NPD	
Nasákavost	WA ₂₄ ≤ 1,5	-	WA ₂₄ 2	
Nebezpečné látky				
- Emise radioaktivita	Ra 226 ≤ 50 Bq/kg, Index ≤ 1,0			
- Uvolňování těžkých kovů a polyaromatic. uhlovodíků	NPD	NPD	NPD	
- Uvolňování jiných nebezpečných látek	NPD	NPD	NPD	
Trvanlivost proti zmrazování a rozmrazování				
- Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	NPD	NPD	NPD	
- Zkouška síranem hofečnatým	NPD	NPD	NPD	
Odolnost proti rozpadavosti čediče	-	NPD	NPD	
Trvanlivost proti alkalicko-křemičité reakci				
- Odolnost proti alkalicko křemičité reakci	rozpínavost < 0,10 % D = 42, S = 47 mmol/l	-	-	

9. Vlastnost výrobku uvedeného v bodě 1 a 2 je ve shodě s vlastností uvedenou v bodě 8.

Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4. Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

Borek 1.7.2013	Jméno a funkce	Ing. Vladimír Bouček, jednatel společnosti	Podpis
----------------	----------------	--	--------

Keppert - AV sadra

PFX-280 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111 AX03
Method : X_UQ_29 mm
Kappa List : AnySample
Shapes & ImpFc : Ca..
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

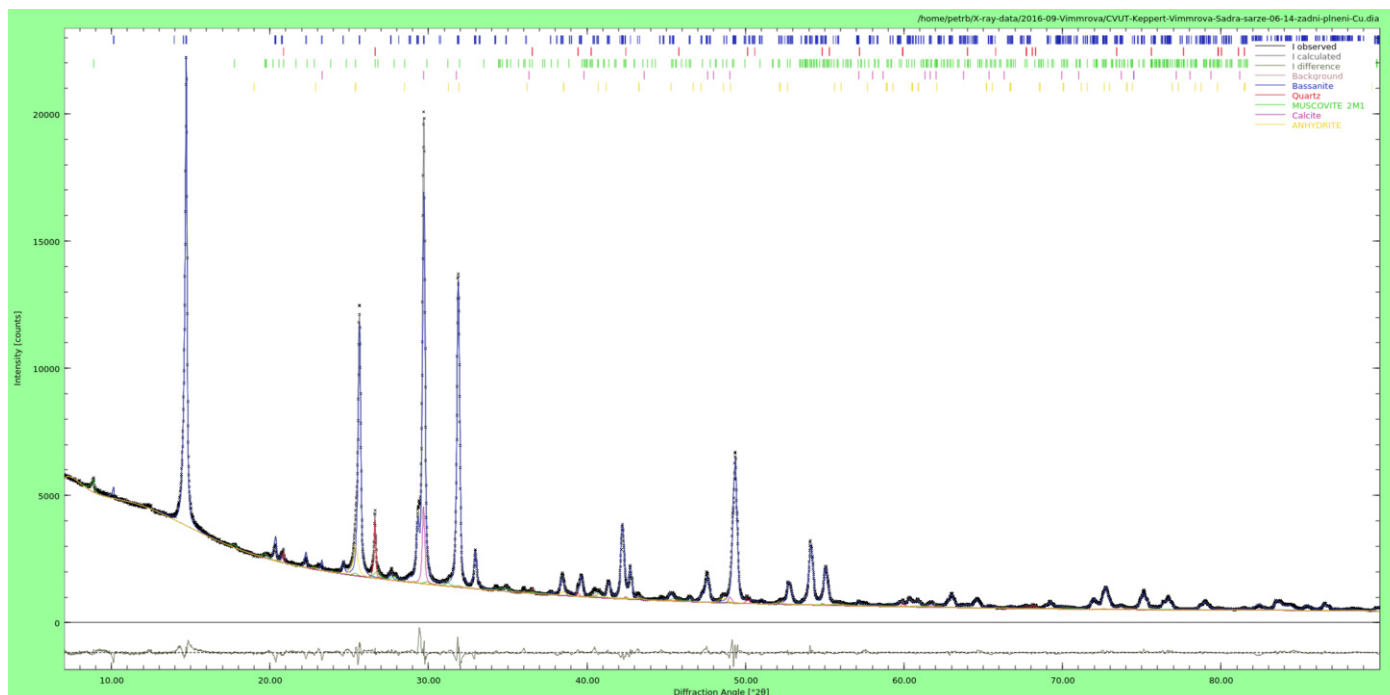
Measured on : 4/20/2016 10:21:04
X-ray Path : Vacuum
Film Type : PP 4mu
Collimator Mask : 29 mm
Viewed Diameter = 29.00 mm
Viewed Area = 660.52 mm2
Viewed Mass = 800.26 mg
Sample Height = 1.00 mm

+ means part of 100% sum			< means wt% < 30			< e means wt% < Est.Err.		
Z	Wt%	Est.Err.	Z	Wt%	Est.Err.	Z	Wt%	Est.Err.
4	BeO		46	PdO	<	46	PdO	<
5	B2O3		47	Ag2O	<	47	Ag2O	<
6	CO2		48	CdO	<	48	CdO	<
7	N		49	In2O3	<	49	In2O3	<
8	O		50	SnO2	<	50	SnO2	<
9	F	<	51	Sb2O3	<	51	Sb2O3	<
11	+Na2O	0.0704 0.022	52	TeO2	<	52	TeO2	<
12	+MgO	0.550 0.027	53	I	<	53	I	<
13	+Al2O3	2.53 0.08	55	Cs2O	<	55	Cs2O	<
14	+SiO2	6.97 0.13	56	+BaO	0.0105 0.0022	56	+BaO	0.0105 0.0022
15	P2O5		57	La2O3	<	57	La2O3	<
15	+P	0.0174 0.0009	58	CeO2	<	58	CeO2	<
16	+SO3	45.66 0.25	59	Pr6O11	<	59	Pr6O11	<
16	S		60	Nd2O3	<	60	Nd2O3	<
17	+Cl	0.0136 0.0010	62	Sm2O3	<	62	Sm2O3	<
18	+Ar	0.0073 0.0010	63	Eu2O3	<	63	Eu2O3	<
19	+K2O	0.422 0.021	64	Gd2O3	<	64	Gd2O3	<
20	+CaO	41.81 0.25	65	Tb4O7	<	65	Tb4O7	<
21	+Sc2O3	<	66	Dy2O3	<	66	Dy2O3	<
22	+TiO2	0.299 0.015	67	Ho2O3	<	67	Ho2O3	<
23	+V2O5	0.0082 0.0011	68	Er2O3	<	68	Er2O3	<
24	+Cr2O3	<	69	Tm2O3	<	69	Tm2O3	<
25	+MnO	0.0326 0.0016	70	Yb2O3	<	70	Yb2O3	<
26	+Fe2O3	0.986 0.049	71	Lu2O3	<	71	Lu2O3	<
27	Co3O4	<	72	HfO2	<	72	HfO2	<
28	+NiO	<	73	Ta2O5	<	73	Ta2O5	<
29	CuO	<	74	WO3	<	74	WO3	<
30	+ZnO	<	75	Re2O7	<	75	Re2O7	<
31	+Ga2O3	<	76	OsO4	<	76	OsO4	<
32	GeO2	<	77	IrO2	<	77	IrO2	<
33	As2O3	<	78	+PtO2	<	78	+PtO2	<
34	SeO2	<	79	Au	<	79	Au	<
35	Br	<	80	HgO	<	80	HgO	<
37	+Rb2O	<	81	Tl2O3	<	81	Tl2O3	<
38	+SrO	0.600 0.030	82	PbO	<	82	PbO	<
39	Y2O3	<	83	Bi2O3	<	83	Bi2O3	<
40	ZrO2	<	90	ThO2	<	90	ThO2	<
41	Nb2O5	<	92	U3O8	<	92	U3O8	<
42	MoO3	<	94	PuO2	<	94	PuO2	<
44	RuO4	<	95	Am2O3	<	95	Am2O3	<
45	Rh2O3	<						

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.6 %

Total Weight% Oxygen = 45.03

Příloha 8



Rietveld refinement to file(s) CVUT-Keppert-Vimmrova-Sadra-sarze-06-14-zadni-plneni-Cu.xy

BGMN version 4.2.22, 6322 measured points, 1026 peaks, 96 parameters

Start: Thu Oct 20 09:37:19 2016; End: Thu Oct 20 09:38:16 2016

136 iteration steps

Rp=2.37% Rpb=11.19% R=3.02% Rwp=3.24% Rexp=2.53%

Durbin-Watson d=0.25

1-rho=0.613%

Global parameters and GOALS

100*bassanite/sum=85.59+-0.32

100*quartz/sum=3.425+-0.068

100*musc2m1/sum=6.45+-0.22

100*Calcite/sum=0.90+-0.28

100*anhydrite/sum=3.64+-0.16

EPS2=-0.0000147+-0.0000044

Local parameters and GOALS for phase Bassanite

SpacegroupNo=5

HermannMauguin=C121

XrayDensity=2.732

Rphase=4.22%

UNIT=NM

A=1.744610+-0.000043

B=0.694571+-0.000026

C=1.201443+-0.000040

BETA=133.3433+-0.0018

k1=0

k2=0.000001540+-0.000000084

GrainSize(1,1,1)=107.2+-2.0

my=0.02001133+-0.000000098

GEWICHT=SPHAR4, MeanValue(GEWICHT)=0.454575

B1=ANISOLIN, MeanValue(B1)=0.00316048, sqrt3(det(B1))=0.00175453

Atomic positions for phase Bassanite

```
-----
4 0.2615 0.1239 0.2591 E=(S(1.0000))
4 0.4160 0.2821 0.1338 E=(S(1.0000))
4 0.0769 0.2935 0.3435 E=(S(1.0000))
2 0.0000 0.6191 0.5000 E=(CA+2(1.0000))
4 0.1783 0.2817 0.9021 E=(CA+2(1.0000))
4 0.3291 0.3246 0.5969 E=(CA+2(1.0000))
2 0.0000 0.1397 0.0000 E=(CA+2(1.0000))
4 0.3208 0.2767 0.3809 E=(O-2(1.0000))
4 0.1863 0.0144 0.2478 E=(O-2(1.0000))
4 0.1894 0.2283 0.1085 E=(O-2(1.0000))
4 0.3102 0.9679 0.2375 E=(O-2(1.0000))
4 0.3353 0.4321 0.0757 E=(O-2(1.0000))
4 0.4907 0.3644 0.1248 E=(O-2(1.0000))
```

4 0.4884 0.2615 0.3019 E=(O-2(1.0000))
4 0.3628 0.0927 0.0624 E=(O-2(1.0000))
4 0.1541 0.4472 0.3923 E=(O-2(1.0000))
4 0.0126 0.3383 0.3804 E=(O-2(1.0000))
4 0.9967 0.2122 0.1877 E=(O-2(1.0000))
4 0.1540 0.1441 0.4569 E=(O-2(1.0000))
4 0.6579 0.5988 0.7178 E=(O-2(1.0000))
2 0.0000 0.4555 0.0000 E=(O-2(1.0000))
4 0.9620 0.5552 0.0142 E=(H(1.0000))
4 0.6914 0.6035 0.6571 E=(H(1.0000))
4 0.7139 0.4869 0.7977 E=(H(1.0000))

Local parameters and GOALS for phase Quartz

SpacegroupNo=154
HermannMauguin=P3_221
XrayDensity=2.645
Rphase=3.16%
UNIT=NM
A=0.491520+-0.000035
C=0.540942+-0.000063
B1=0.00221+-0.00022
k2=0.00000015+-0.00000011
GrainSize(1,1,1)=192+-19
my=0.00949386+-0.00000090
GrainSize(1,0,1)=192+-19
GEWICHT=0.01893+-0.00037

Atomic positions for phase Quartz

3 0.4700 0.0000 0.6667 E=(SI+4(1.0000))
6 0.4150 0.2680 0.7860 E=(O-2(1.0000))

Local parameters and GOALS for phase MUSCOVITE_2M1

SpacegroupNo=15
HermannMauguin=C12/c1
XrayDensity=2.773
Rphase=3.09%
UNIT=NM
A=0.52349+-0.00037
B=0.9009+-0.0013
C=2.00565+-0.00073
BETA=96.0000
GrainSize(1,1,1)=70.7355
my=0.01247+-0.00013
k2=0.0000500000
B1=0.00600000
GEWICHT=SPHAR2, MeanValue(GEWICHT)=0.0352454

Atomic positions for phase MUSCOVITE_2M1

8 0.2510 0.0838 0.0004 E=(AL+3(0.9600),FE+3(0.0400))
4 0.0000 0.0986 0.2500 E=(K+1(0.8506))
p=0.851+-0.032

8 0.0345 0.4295 0.3646 E=(SI+4(0.7500))
8 0.0345 0.4295 0.3646 E=(AL+3(0.2500))
8 0.4514 0.2582 0.1355 E=(SI+4(0.7500))
8 0.4514 0.2582 0.1355 E=(AL+3(0.2500))
8 0.0429 0.0617 0.4501 E=(O-2(1.0000))
8 0.3836 0.2511 0.0536 E=(O-2(1.0000))
8 0.0380 0.4447 0.4463 E=(O-2(1.0000))
8 0.4128 0.0925 0.1682 E=(O-2(1.0000))
8 0.2516 0.3726 0.1688 E=(O-2(1.0000))
8 0.2469 0.3083 0.3426 E=(O-2(1.0000))

Local parameters and GOALS for phase Calcite

SpacegroupNo=167
HermannMauguin=R-32/c
XrayDensity=2.791
Rphase=3.52%
UNIT=NM
A=0.494100
C=1.68986+-0.00029
k2=0.00000008+-0.00000010
B1=0.0040+-0.0010

my=0.0206895+-0.0000035
GrainSize(1,1,1)=105+-27
GEWICHT=SPHAR4, MeanValue(GEWICHT)=0.00477602
Atomic positions for phase Calcite

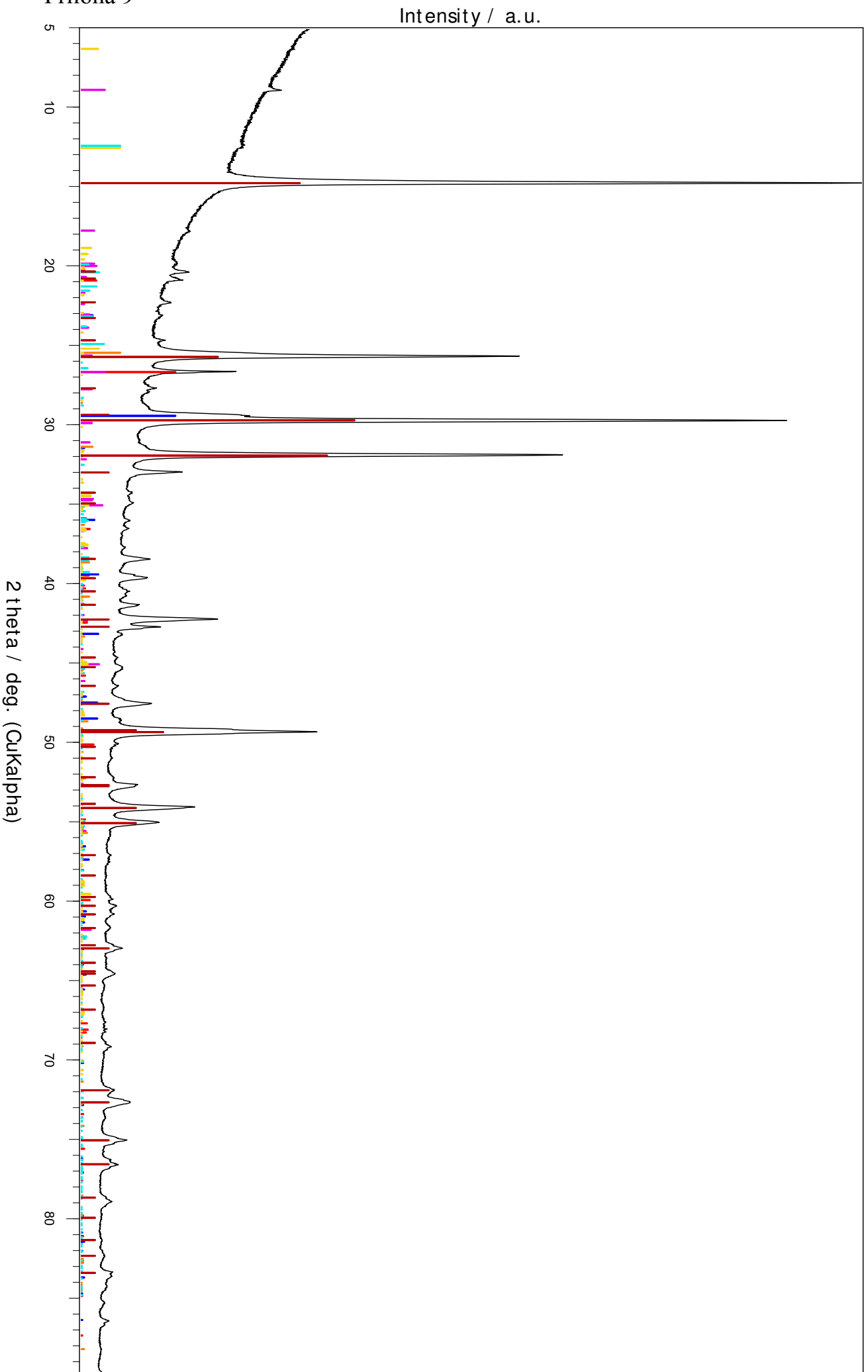
6 0.0000 0.0000 0.0000 E=(CA(1.0000))
6 0.0000 0.0000 0.2500 E=(C(1.0000))
18 0.2573 0.0000 0.2500 E=(O(1.0000))

Local parameters and GOALS for phase ANHYDRITE

SpacegroupNo=63
HermannMauguin=C2/m2/c2_1/m
XrayDensity=2.941
Rphase=4.21%
UNIT=NM
A=0.70085+-0.00071
B=0.62635+-0.00051
C=0.70045+-0.00019
B1=0.00700000
k2=0.0000342+-0.0000045
GrainSize(1,1,1)=60.6305
my=0.022769+-0.000015
GEWICHT=SPHAR4, MeanValue(GEWICHT)=0.0191204
Atomic positions for phase ANHYDRITE

4 0.0000 0.6540 0.2500 E=(CA+2(1.0000))
4 0.0000 0.1550 0.2500 E=(S(1.0000))
8 0.3290 0.5150 0.2500 E=(O-2(1.0000))
8 0.0000 0.7020 0.9200 E=(O-2(1.0000))

Příloha 9



CVUT Keppert Vimrova Sadra sarze 06/ 14

46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO2

05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO3

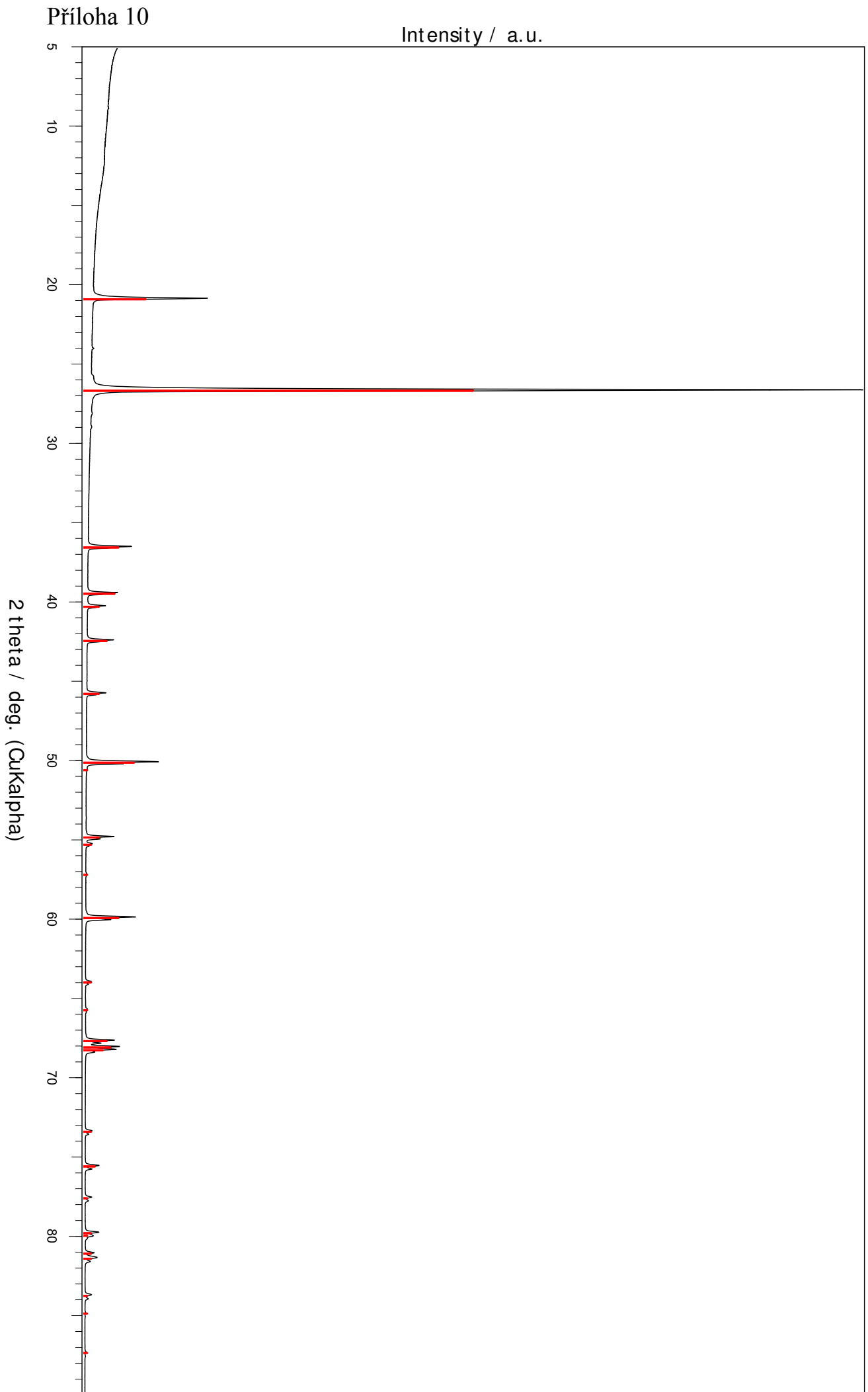
07-0032 (D) - Muscovite 2M1, syn - KAl2(S3Al)O10(OH)2

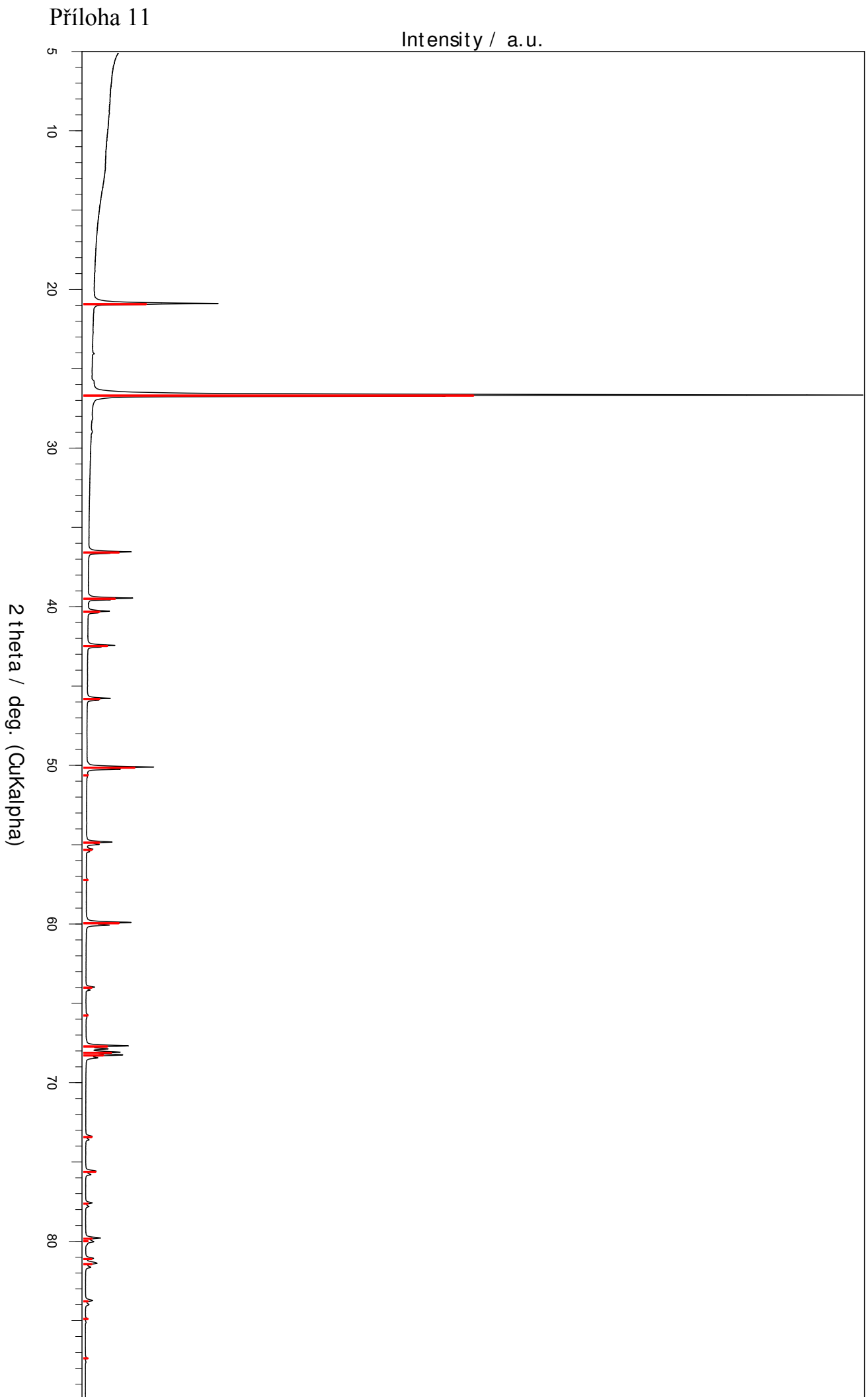
41-0224 (I) - Bassanite, syn - CaSO4·0.5H2O

37-1496 (*) - Anhydrite, syn - CaSO4

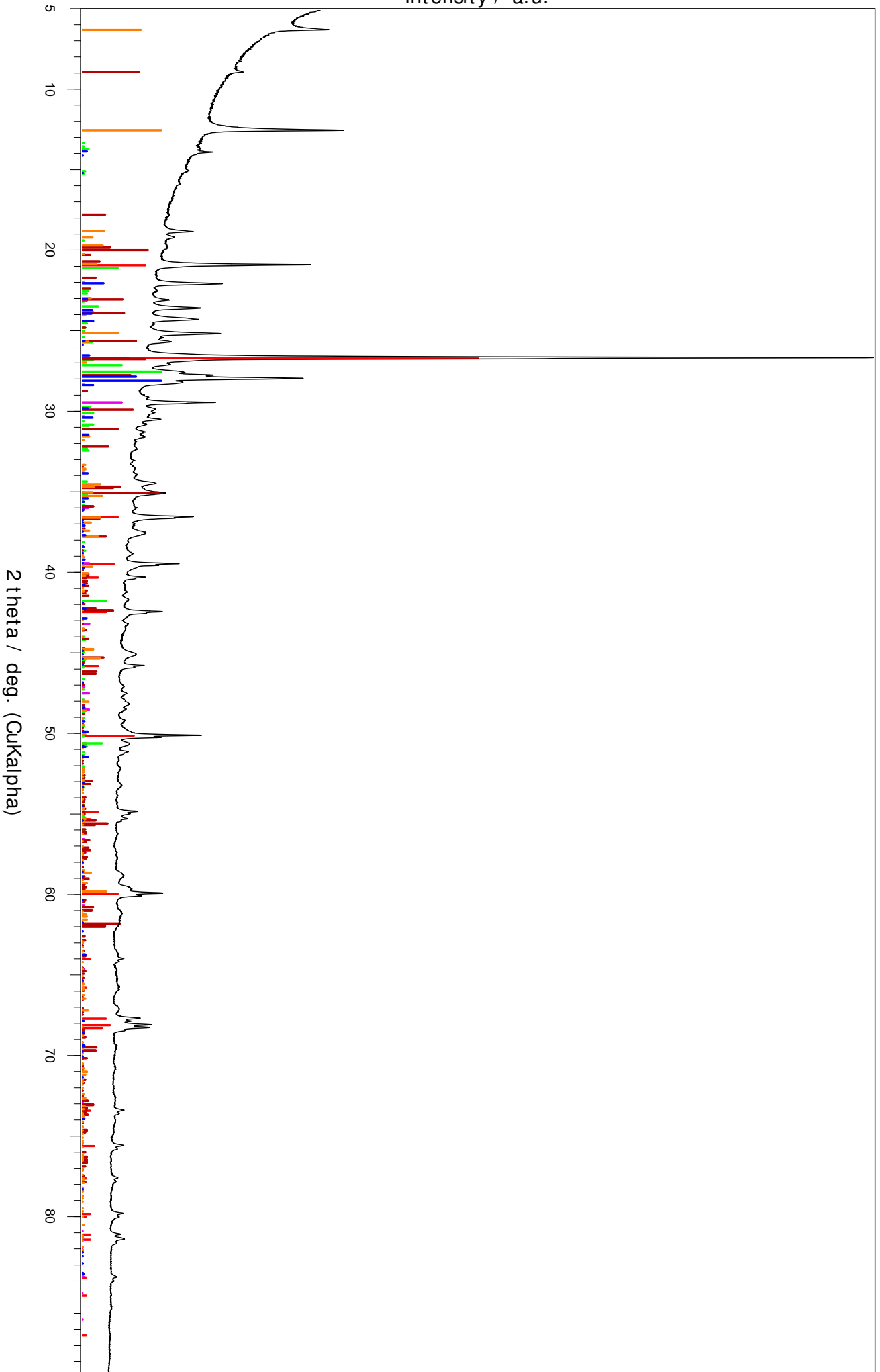
80-0885 (C) - Kaolinite 1 ITA Rg - Al2(S2O5)(OH)4

85-2163 (C) - Chamosite 1 ITM RgIIb - (Mg5.036Fe4.964)Al2.724(S5.70Al2.30O20)(OH)16





Intensity / a.u.



CVUT - Keppert - SA-as-received

46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO2

41-1480 (I) - Albite, calcian, ordered - (Na,Ca)Al(S,Al)3O8

19-0932 (I) - Microcline, intermediate - KAlSi3O8

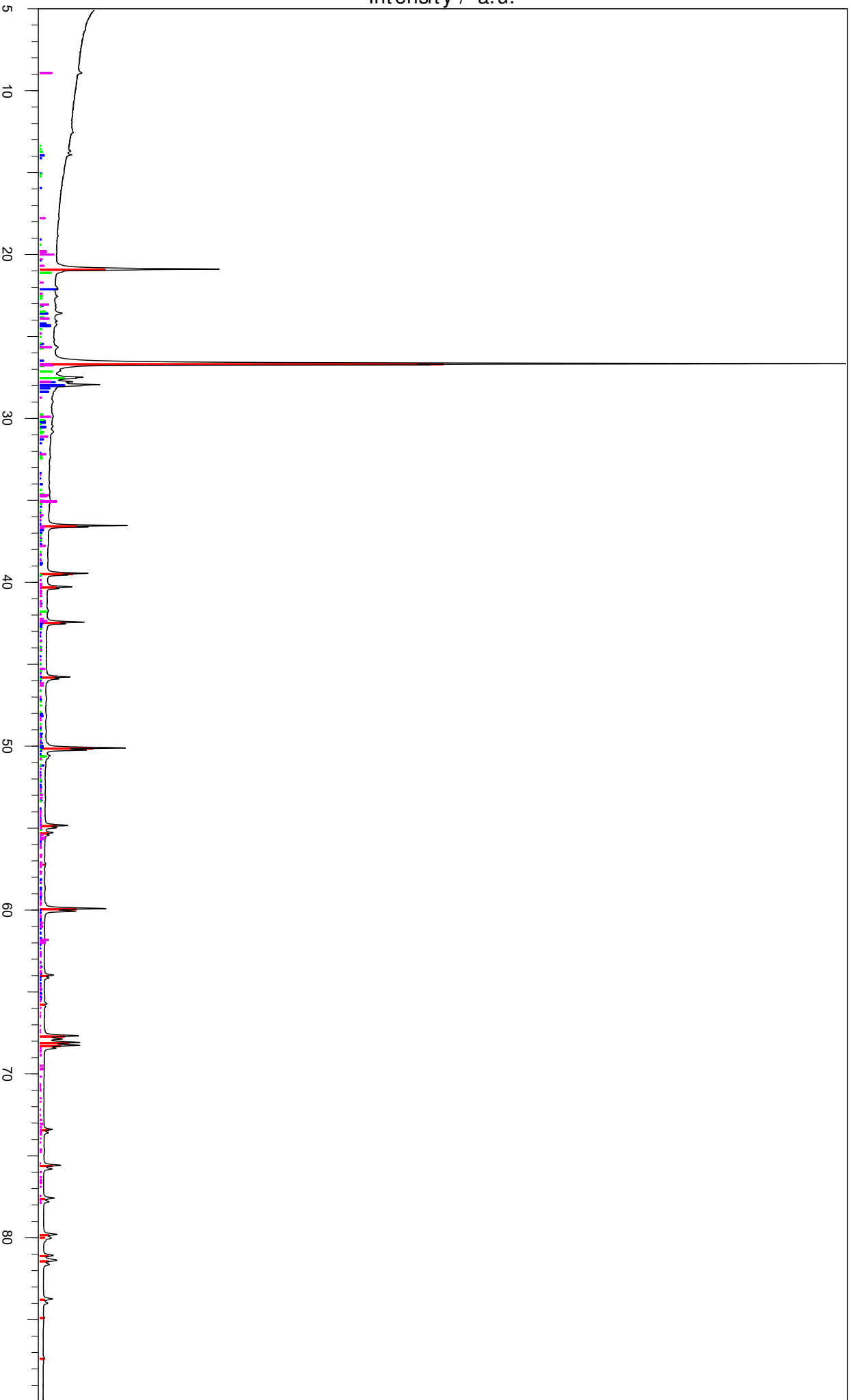
05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO3

76-0637 (C) - Muscovite 2 ITM 1 - KAl2(S3Al)O10(OH)2

79-1270 (C) - Clinocllore - (Mg2.96Fe1.55Fe.136Al1.275)(S2.622Al1.376O10)(OH)8

Intensity / a.u.

2 theta / deg. (CuKalpha)



CVUT - Keppert - SB-as-received
46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO2
72-1245 (A) - Albite low - Na(AlSi3O8)
19-0932 (I) - Microcline, intermediate - KAlSi3O8

76-0637 (C) - Muscovite 2 ITM 1 - KAl2(S3Al)O10(OH)2