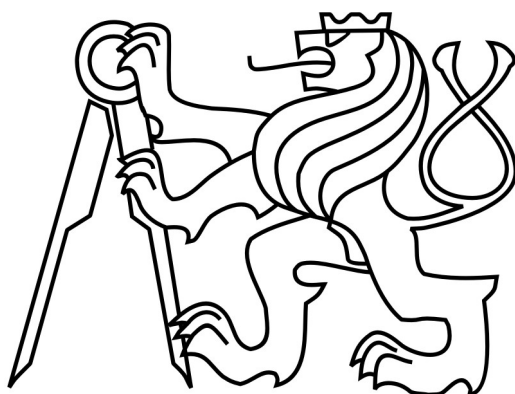


České vysoké učení technické v Praze Fakulta stavební

Katedra mechaniky



Diplomová práce

2017

Bc. Michal Hanzálek


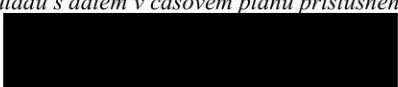


ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE



Příjmení: <u>Hanzálek</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>369497</u>
Zadávací katedra: <u>K132</u>		
Studijní program: <u>(N3607) Stavební Inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>(3608T008) Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Mechanické vlastnosti cementových malt s příměsí mikromleté strusky</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Mechanical properties of cement mortars with microfine slag admixture</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1) Zpracování rešerše na dané téma	
2) Vytvoření vzorků cementové malty s různým poměrem cementu a strusky	
3) Stanovení souboru mechanických vlastností pomocí destruktivních a nedestruktivních metod	
4) Zpracování a vyhodnocení získaných výsledků	
Seznam doporučené literatury:	
Články z databáze WoS, SCOPUS	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>ing. Pavel Tesárek PhD.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>11.10.2016</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2017</u>
	
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“.

	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího práce Ing. Pavla Tesárka, Ph.D. a konzultanta Ing. Josefa Fládra Ph.D.

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

V Praze dne

.....

podpis autora

Chtěl bych poděkovat zejména vedoucímu práce Ing. Pavlu Tesárkovi Ph.D. za ochotný a aktivní přístup při vedení diplomové práce. Poděkování patří i Ing. Josefu Fládrovi Ph.D. za provedená měření. Děkuji i rodině a přátelům, kteří mě během studia podporovali.

Mechanické vlastnosti cementových
malt s příměsí mikromleté strusky

Mechanical Properties of Cement
Mortars with Microfine Slag Admixture

Anotace:

Práce se zabývá využitím metalurgických strusek jako stavebního materiálu, konkrétně jejich aplikaci jako náhradu portlandského cementu po úpravě vysokorychlostním mletím. Pro studii jejich vlastností byly zhotoveny zkušební vzorky malty s různým obsahem dvou různých druhů takto upravené strusky. Vzorky byly testovány pomocí destruktivních i nedestruktivních zkušebních metod, jejichž účelem bylo sledování vývoje mechanických vlastností těchto malt v prvním měsíci od výroby. Mezi sledované vlastnosti zde patří objemové změny, Youngův modul pružnosti a pevnost v tahu za ohybu a tlaku.

Klíčová slova: Struska, cement, malta, materiálové parametry

Abstract:

This thesis deals with utilization of metallurgical slags as construction materials, specifically their use in replacing portland cement in their micro-fine form. To study their properties, two sets of samples of mortars were made, each containing different kind of micro-fine slag in varying quantities. The samples were tested using destructive and non-destructive methods to analyse the development of the mechanical properties of these mortars during the first month after production. The studied properties were volumetric changes, Young's modulus of elasticity and tensile and compressive strength.

Keywords: Slag, cement, mortar, material characteristics

1 Obsah

Úvod.....	7
1 Přehled o současném stavu problematiky	8
1.1 <i>Druhy strusek a jejich původ.....</i>	8
1.1.1 Metalurgické strusky	8
1.1.2 Strusky při spalování pevných paliv (popílek)	10
1.1.3 Vulkanická struska.....	10
1.2 <i>Vlastnosti metalurgických strusek.....</i>	10
1.2.1 Chemické složení vysokopecní strusky	10
1.2.2 Chemické složení ocelářských strusek.....	11
1.2.3 Mineralogické složení.....	12
1.2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti surové strusky.....	12
1.2.5 Chlazení strusky a její formy.....	13
1.3 <i>Hydraulická reaktivita strusek</i>	15
1.3.1 Chemické složení.....	15
1.3.2 Skelná fáze.....	16
1.3.3 Hydratace strusky	17
1.4 <i>Užití metalurgických strusek</i>	18
1.4.1 Zpracování surového produktu	18
1.4.2 Struska jako náhrada kameniva	18
1.4.3 Směsné cementy	19
1.4.4 Izolační materiál	19
1.4.5 Alkalicky aktivovaná pojiva a geopolymery	20
1.5 <i>Alkalicky aktivovaná strusková pojiva</i>	20
1.5.1 Alkalické aktivátory.....	21
1.5.2 Mechanismus hydratace.....	21
1.5.3 Vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových malt	22
1.6 <i>Geopolymery</i>	23
1.6.1 Princip geopolimerů.....	23
1.6.2 Vlastnosti geopolimerů	24
1.7 <i>Normy.....</i>	25
1.7.1 ČSN EN 15167-1.....	25
1.7.2 ČSN EN 15167-2.....	25
1.7.3 ČSN 72 2009	25
1.7.4 ČSN EN 206	25
1.8 <i>Environmentální dopady</i>	26
1.8.1 Objem světové produkce	26
1.8.2 Ekologie výroby	27
2 Cíle práce	28
3 Metodika	29
3.1 <i>Materiály.....</i>	29
3.1.1 XRD analýza strusek	29
3.1.2 Chemické složení strusek	33
3.1.3 Cement.....	34
3.1.4 Voda	34
3.2 <i>Zkušební vzorky.....</i>	35
3.2.1 Výroba vzorků	35
3.2.2 Odformování a uložení vzorků	36
3.3 <i>Nedestruktivní měření</i>	36
3.3.1 Stanovení konzistence čerstvé malty	36

3.3.2	Měření rozměrů, hmotnosti a smrštění	38
3.3.3	Měření dynamického modulu pružnosti metodou pulzního buzení	38
3.3.4	Výpočet modulů pružnosti z dat získaných metodou pulzního buzení	41
3.3.5	Měření modulu pružnosti ultrazvukovou metodou	44
3.4	<i>Destruktivní měření</i>	45
3.4.1	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu	45
3.4.2	Zkouška pevnosti v tlaku	46
4	Výsledky experimentů	48
4.1	<i>Nedestruktivní zkoušky</i>	48
4.1.1	Zkouška konzistence čerstvé malty	48
4.1.2	Objemová hmotnost	49
4.1.3	Smrštění	50
4.1.4	Zkouška impulzním buzením – podélný a smykový modul pružnosti	51
4.1.5	Srovnání hodnot modulu pružnosti z různých metod měření	57
4.2	<i>Vyhodnocení výsledků nedestruktivních zkoušek</i>	58
4.3	<i>Destruktivní zkoušky</i>	59
4.3.1	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu	59
4.3.2	Zkouška pevnosti v tlaku	61
4.3.3	Modul pružnosti z destruktivních zkoušek	63
4.4	<i>Vyhodnocení výsledků destruktivních zkoušek</i>	64
4.5	<i>Vyhodnocení strusek dle ČSN EN 15167-1</i>	65
4.5.1	Chemické složení	65
4.5.2	Jemnost	66
4.5.3	Index účinnosti	66
5	Závěr	67
	Literatura	69
	Seznam tabulek	72
	Seznam použitých norem	73
	Seznam obrázků	74
	Seznam příloh	76

Úvod

Při výrobě surového železa ve vysoké peci jsou železné rudy zbavovány kyslíku a ostatních nečistot pomocí reakcí probíhajících za vysokých teplot za pomoci struskotvorných přísad. Většina těchto nečistot a přísad tvoří dohromady taveninu zvanou vysokopecní struska. Obdobný proces probíhá při výrobě oceli, kde se snižuje obsah uhlíku v surovém železe a zároveň se odstraňují dodatečné nečistoty. I zde vzniká odpadní tavenina, v tomto případě mluvíme o struskách ocelářských.

Historie užití strusky pro stavební účely začala již ve starověkém Římě, kde byla využívána zejména pro povrchy cest. S nástupem průmyslové revoluce však produkce železa a oceli dramatickým způsobem narostla a objem produkované strusky brzy zdaleka přesáhl její spotřebu. Přibližně v polovině 19. století se pro strusku začali nacházet nová využití, zejména jako agregát do betonu a některé druhy strusky našli své uplatnění jako hydraulické pojivo, spotřeba strusky ale zůstala i nadále pozadu za její produkcí. A to až do začátku 20. století, kdy se začala uplatňovat jako agregát do asfaltových povrchů silnic a cest, což vedlo ke spotřebě do té doby nevyužitých zásob a v současnosti je spotřeba strusky v relativní rovnováze s její produkcí.

I přes jejich užitečnost je hodnota strusky oproti surovému železu či oceli velmi nízká, pro metalurgické společnosti tedy nadále zůstává spíše odpadem než plnohodnotným produktem a je běžnou praxí, že jsou na likvidaci strusky najímány specializované společnosti, které často za strusku neplatí, pouze zařídí její zpracování a prodej, ze kterého odvádí určitou část závodu, který strusku vyprodukoval.

Kromě hlediska ekonomického je využití strusky důležité i pro životní prostředí. Metalurgický průmysl je největším spotřebitelem energie ze všech výrobních odvětví. Energie vynaložená při výrobě železa a oceli na vznik strusky je v podstatě zbytečná, pokud se struska nevyužije. Svým složením a procesem výroby je struska velmi podobná portlandskému cementu, což je další průmyslové odvětví s vysokou spotřebou energie a velkým objemem produkce zplodin, zejména CO₂. Zefektivněním využívání strusky lze cement částečně nahradit a dopad těchto dvou odvětví na životní prostředí zmírnit.

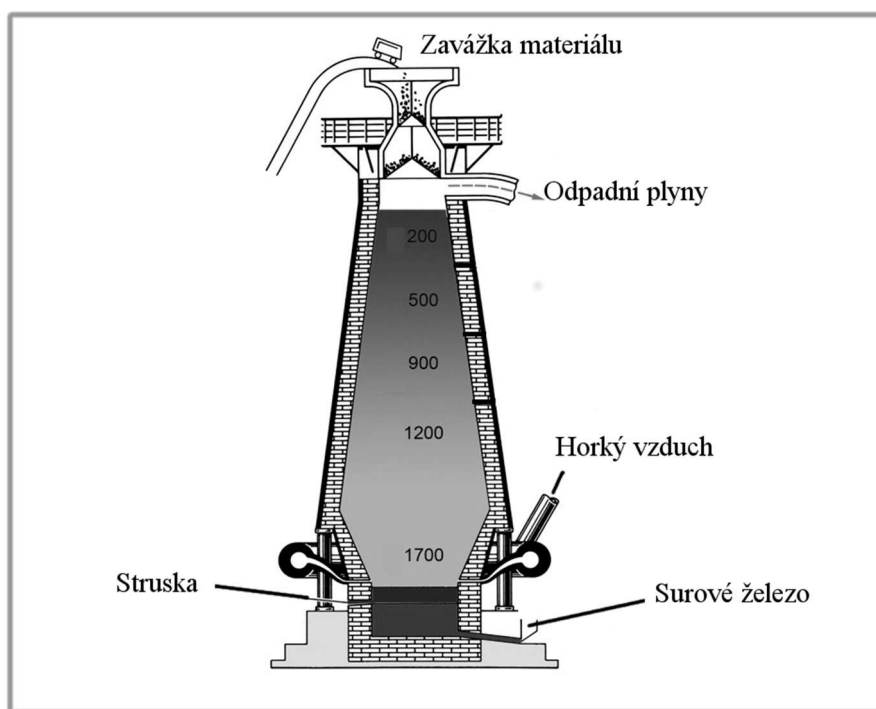
1 Přehled o současném stavu problematiky

1.1 Druhy strusek a jejich původ

1.1.1 Metalurgické strusky

Vysokopecní struska (*Blast Furnace Slag – BFS*) a ocelářská struska tvoří největší podíl vedlejších produktů sléváren. Ocelářská struska je vedlejším produktem při tvorbě oceli ze železa v konvertorech (*Basic Oxygen Furnace – BOF*), nebo při tavení šrotu během výroby oceli v elektrických obloukových pecích (*Electric Arc Furnace – EAF*). Obě tyto strusky jsou si vlastnostmi podobné, výjimku tvoří strusky z licích pánví (*Ladle Furnace – LF*), které se, díky dodatečné úpravě v pánvi, od předchozích dvou svými vlastnostmi liší [Shi, 2004], například vyšším obsahem hlinitanů a jejich složení je více proměnlivé nežli tomu je u vysokopecních a ocelových strusek, jejich užití je tedy tímto značně omezeno, protože je potřeba provádět u každého zdroje analýzu složení a struktury dané strusky [Setién et al., 2009].

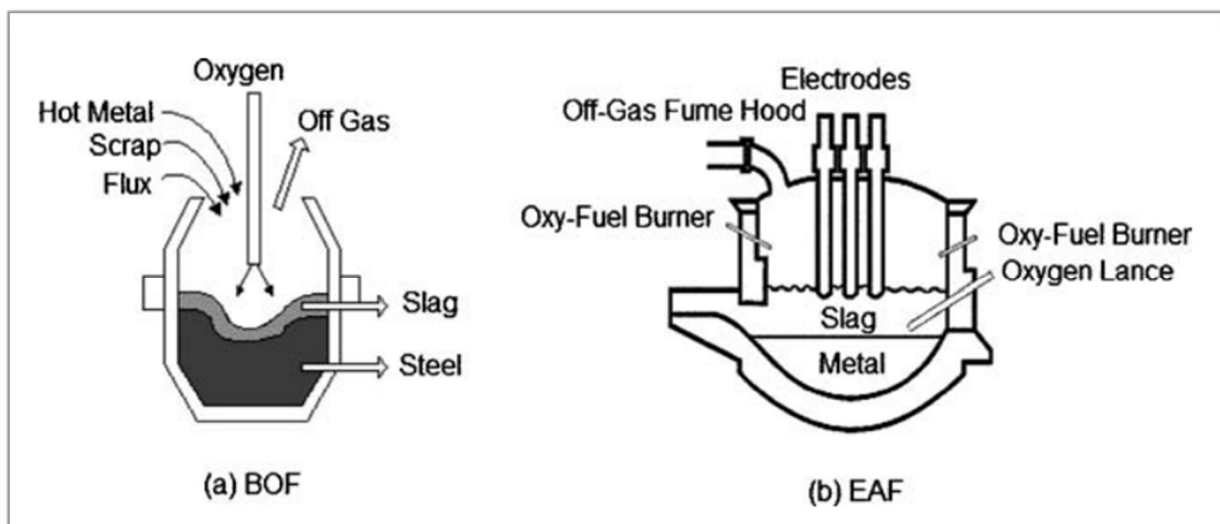
Struska v pecích vzniká jako odpadní produkt při procesu výroby za účelem odstranění nečistot z železa, případně oceli, snížení tavicí teploty hlušin a ochraně železa před zpětnou oxidací. Do vysoké pece se zaváží ruda, koks a struskotvorné přísady (nejčastěji vápenec a dolomit). Vrstva strusky se tvoří ve spodní části pece, přímo nad vrstvou surového železa a je odváděna obdobným způsobem, jako samotné železo, viz Obrázek 1-1.



Obrázek 1-1 Schéma vysoké pece [www.chemistrysources.com]

Ocelářské strusky jsou, jak již bylo zmíněno, produkovány dvěma odlišnými způsoby. Při výrobě v konvertorech je do pece zavedeno žhavé surové železo, železný šrot a struskotvorné přísady (obvykle vápenec a dolomit). Poté je do konvertoru tryskou injektován kyslík pod vysokým tlakem. Kyslík se během toho procesu váže na nečistoty, v případě uhlíku tvoří oxid uhelnatý, který je odváděn jako plyn. Další nečistoty jako křemík, fosfor, mangan a částečně železo, tvoří tekuté oxidy, které poté v kombinaci s vápencem a dolomitem tvoří právě strusku.

Při výrobě v elektrických obloukových pecích se nepoužívá žhavé surové železo, ale „studený“ železný šrot, který je takto relativně ekologicky recyklován. Vlastní konstrukce pece má tvar konve s otevíratelným poklopem, kterým jsou do pece zavedeny tři grafitové elektrody, kterými je do kovu vpouštěn elektrický proud, čímž vzniká teplo potřebné k roztavení kovu. V průběhu tohoto procesu jsou přidány ostatní kovy, které výsledné oceli dodávají požadované chemické složení. Obdobně jako u konvertoru je i zde do pece vháněn kyslík, který se váže na nečistoty. Po dosažení požadovaného složení je celá konstrukce nahnuta a struska, která plave na povrchu je odvedena. Ocel je poté nahnutím na opačnou stranu odvedena do lící pánve, kde se dodatečně odstraňují nečistoty. Pro schéma obou pecí viz Obrázek 1-2. Úprava v lící pánvi také produkuje strusku, ta je ale vlastnostmi a složením odlišná od prvotní strusky, hlavně kvůli většímu množství přísad potřebných pro tento proces [Shi et al., 2006].



Obrázek 1-2 Schéma konvertorové (BOF) a obloukové pece (EAF) [Shi, 2004]

1.1.2 Strusky při spalování pevných paliv (popílek)

Popílek je vedlejším produktem při spalování uhlí v elektrárnách a spalování odpadů při jejich likvidaci ve spalovnách. V minulosti bylo běžné jejich vypouštění do ovzduší, dnes je spíše snaha o jejich úplné zachycení, jednak z důvodů ekologických, ale i ekonomických, jelikož pro ně byla nalezena nová využití. Zachycení je obvykle prováděno mechanickými filtry nebo elektrostatickými odlučovači, případně jejich kombinací. U uhelných elektráren závisí charakter popílku na druhu spalovaného uhlí a typu kotle. Popílek může být křemičitý, křemičito-vápenatý nebo vápenatý. Všechny tyto varianty vykazují pucolánové a/nebo latentně hydraulické vlastnosti. Vápenatý popílek je úspěšně užíván jako náhrada cementu v betonu, což vede k vyšší spotřebě vody a nižší počáteční pevnosti, zatímco konečná pevnost a trvanlivost jsou tak zlepšeny. V České Republice je na výrobu betonu využito přibližně 11 % celkové produkce popílku [Šmilauer et al, 2014].

1.1.3 Vulkanická struska

Vulkanickou struska je termín používaný pro pórovité fragmenty pyroklastické materiálu bazaltového až andezitového složení, které jsou vyvrhovány z jícnu během explozivní erupce. Jednotlivé částice mají převážně velikost lapilli (2–64 mm). Jejich pórovitá struktura je dána množstvím unikajících vulkanických plynů v okamžiku jejich formování. Barva strusky je typicky tmavě šedá až černá, což je dáno poměrně velkým obsahem železa. Struska nejčastěji vzniká v průběhu strombolských erupcí a je základním stavebním materiálem sypaných kuželů. Vulkanické strusky a popílek nejsou pro tuto studii podstatné, proto se další kapitoly zabývají pouze struskami metalurgickými.

1.2 **Vlastnosti metalurgických strusek**

Kapitola bude zaměřena na složení, chemické a fyzikální vlastnosti strusek a procesy jejich chlazení, které tyto vlastnosti zásadním způsobem ovlivňují.

1.2.1 Chemické složení vysokopecní strusky

Chemické složení strusky je závislé zejména na vstupních surovinách při výrobě. Druh vyráběného železa a množství koksu použitého při výrobě mohou výsledné složení také ovlivnit. K základním složkám odpichové strusky patří CaO, MgO, Al₂O₃ a SiO₂, které tvoří 80–90 % hmotnosti celého systému a na vlastnosti strusky mají rozhodující vliv. Mezi ostatní,

méně zastoupené složky patří FeO, Fe₂O₃, MnO nebo Cr₂O₃, které jsou obvykle obsaženy v počtu několika procent. Konkrétní hodnoty zastoupení jednotlivých složek se mezi různými zdroji poměrně liší a to i u zdrojů, které udávají rozsah procentuálního zastoupení. Záleží zde na konkrétních výrobních postupech a roce, kdy byla data sbírána.

1.2.2 Chemické složení ocelářských strusek

Chemické složení ocelářských strusek je více proměnlivé, než je tomu u strusek vysokopecních a to i v rámci jednotlivých sazeb v jedné výrobě. Struska z konvertorových pecí (BOF) je chemicky velmi podobná strusce z obloukových pecí, vznikající při výrobě uhlíkové oceli (EAF-C). U obou je zastoupení relativně podobné vysokopecní strusce, obecně mají nižší obsah křemíku a vyšší obsah železa a manganu.

Struska vznikající v elektrických obloukových pecích při výrobě slitin a nerezové oceli (EAF – A/S) má obsah železa srovnatelný s vysokopecní struskou, zásadním rozdílem je zde obsah chromu, který může být až 20%, což v některých zemích jako USA nebo Kanadě vede k označení těchto strusek jako nebezpečné odpady [Shi et al., 2006]. V ČR tyto strusky jako nebezpečné specifikuje katalog odpadů – položka 19 01 11 – Popel a struska obsahující nebezpečné látky [Vyhláška č. 93/2016 Sb. v platném znění]. Tabulka 1-1 obsahuje orientační hodnoty chemického složení u běžných strusek.

Složka	Vysokopecní struska	Ocelářské strusky				Reference	
		BOF	EAF - C	EAF - A/S	Ladle	Cement	Andezit
CaO	35-42	30-55	35-60	39-45	30-60	64,2	5,8
SiO ₂	33-38	8-20	9-20	24-32	2-35	22	59,6
FeO	0,1-2,8	10-35	15-30	1-6	0,1-15	3	3,1
MgO	7-12	5-15	5-15	5-20	1-10	1,5	2,8
Al ₂ O ₃	10-15	1-6	2-9	3-7,5	5-35	5,5	17,3
S	1-1,5	0,05-0,15	0,08-0,2	0,1-0,3	0,1-1	2	-
MnO	<1,0	2-8	3-8	0,4-2	0-5	-	-
Cr	-	0,1-0,5	0,1-1,0	0,1-20	0-0,5	-	-
P	<0,1	0,2-2	0,01-0,25	0,01-0,07	0,1-0,4	-	0,2

Tabulka 1-1 Orientační hodnoty chemického složení různých druhů metalurgických strusek (% hmotnosti) [Grubeša et al., 2016].

Složení strusek z licích pánví (*Ladle furnace*) se od ostatních ocelářských strusek liší zejména tím, že u nich najdeme zdaleka největší rozptýlení jednotlivých sloučenin. Některé výroby používají k dodatečným úpravám oceli hliník, což vede k vyššímu obsahu Al_2O_3 a to až 35 %. Alternativou zde může být užití CaF_2 . V tomto případě se výsledná struska skládá především z CaO a SiO_2 .

Obdobně jako u cementu se u posouzení jakosti strusky používají moduly. Z chemického hlediska je důležitý modul zásaditosti, který vyjadřuje poměr mezi zásaditými a kyselými oxidy. O těchto modulech bude blíže pojednáno v kapitole 1.3. Vysokopecní strusky obvykle mají zásaditý charakter, jejich pH se pohybuje v rozmezí 8-10 [Drochytka & Matulová, 2009]. Další složkou, kterou je vhodné sledovat zejména při užívání strusky ve stavebnictví je obsah sloučenin síry, které by při běžných hodnotách neměli mít na vlastnosti zásadní vliv, ale při zvýšeném obsahu mohou působit například korozi výztuže.

1.2.3 Mineralogické složení

Mineralogické složení je závislé na chemickém složení dané strusky, především ale také na procesu ochlazení strusky. Strusku je možné chladit vodou, vodní párou, případně pouze vzduchem a každý z těchto procesů produkuje jinou formu strusky. Pro krystalické strusky platí následující složení: převažuje melilit (až 90 %), což je amorfní forma směsi gehlenitu (C_2AS) a akermanitu (C_2MS_2). Dalšími složkami bývají larnit ($\alpha\text{-C}_2\text{S}$), šannonit ($\beta\text{-C}_2\text{S}$), mervinit (C_3MS_2), pseudowollastonit ($\beta\text{-CS}$), monticellit (CMS). Méně často se objevují rankinit (C_3S_2), diopsid (CMS_2), anortit (CAS_2), kordierit (M_2AS_5), madisonit ($\text{C}_2\text{M}_2\text{AS}_3$) aj. [Drochytka & Matulová, 2009].

1.2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti surové strusky

Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou velmi závislé na různých procesech chlazení strusky, které budou podrobněji probrány v následující kapitole. Mechanické vlastnosti jsou důležité zejména pro využití strusky jako hrubý agregát do betonu. Za tímto účelem je nejčastěji využívána pomalu chlazená struska, která má obvykle větší podíl hrubé frakce, než rychle chlazené strusky.

Pomalu chlazená vysokopecní struska, obvykle chlazená vzduchem, má pevnost v tlaku přibližně 100 MPa [National Slag Association, 2016]. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí 2100-2800 kg/m^3 , v závislosti na velikosti dané frakce. U expandované strusky

je objemová hmotnost přibližně o 30 % nižší. Jejich vnitřní úhel tření bývá 35–40 °, nasákavost 1–8 % a tvrdost 5-6 Mohsovy stupnice [Federal Highway Administration, 2012].

Ocelářské strusky obsahují větší množství železa a manganu, což obecně způsobuje jejich vyšší tvrdost, hustotu i objemovou hmotnost. U těchto strusek dosahuje objemová hmotnost hodnot až 3200-3600 kg/m³ a jejich pevnost v tlaku 200 MPa [National Slag Association, 2016]. Vnitřní úhel tření u je u těchto strusek 40–45° [Federal Highway Administration, 2012].

1.2.5 Chlazení strusky a její formy

Proces chlazení strusky má zásadní vliv na konečnou podobu finálního produktu. Strusku lze chladit několika způsoby: pasivně vzduchem, vodním postřikem, vodní parou, hašením vodou, případně hašením vzduchem.

Pasivní chlazení vzduchem znamená vysypání žhavé strusky do připravené jámy, případně na zem, která následně chladne bez dalšího zasahování do procesu. Výsledný produkt má formu velkých hrudek a prachu. Prach vzniká silikátovým rozpadem β -C2S na γ -C2S při teplotě kolem 675 °C. Gamma dikalciumsilikát má rozdílnou krystalickou strukturu a dochází tak k nárůstu objemu až o 10 %, což způsobuje rozpad krystalů na prachovou formu. K tomuto procesu dochází i za nízkých teplot, ale podstatně pomaleji, i v horizontu několika let [Durinck et al., 2008]. Struska chlazená vzduchem nemá vlastnosti vhodné pro výrobu pojiv, jelikož výsledná struktura je převážně krystalická a síra je ve strusce vázána převážně ve formě Oldhamitu (CaS) [Regourd, 1986]. Produktem tohoto procesu je hrubý agregát zvaný air-cooled slag (Obrázek 1-3).



Obrázek 1-3 Vysokopecní struska chlazená vzduchem (Air-cooled blast furnace slag) [www.euroslag.org]

Při chlazení vodním postřikem, obdobně jako u chlazení vzduchem, je žhavá struska vysypána do připravené jámy a chlazena vzduchem. Po vytvoření pevných hrudek je proces urychlen stříkáním vody na povrch strusky, což zajišťuje rozpad na menší částice vlivem prudké teplotní změny a také z větší části zabraňuje silikátovému rozpadu na prach, protože struska je kratší dobu vystavena teplotám podporujícím tento rozpad [Shi, 2004]. Výsledná forma je obdobná ACS, pouze s jemnějšími částicemi, také u ní lze obvykle najít větší sklovitost výsledné struktury.

Hašení vodou znamená prudké ochlazení žhavé strusky velkým množstvím vody z trysek pod vysokým tlakem (obvykle 0,6 MPa), končící úplným ochlazením materiálu. Spotřeba vody je přibližně 3 m³ na tunu materiálu, přičemž přibližně 30 % této vody zůstává ve strusce po ochlazení a je nutno ji posléze odstranit vysušením [Özbay et al. 2016]. Výsledným produktem je granulovaná vysokopeční struska (Obrázek 1-4). Hašení vodou je vhodné zejména u strusek pro použití ve stavebnictví, mletou formu této strusky lze například použít přímo jako přísadu do cementu bez dalších úprav a to díky sklovité struktuře, která takto vzniká. Rychlé chlazení obvykle není používáno u ocelářské strusky, která má vyšší viskozitu, což může způsobit problém při uvěznění vody ve žhavé strusce a následně způsobuje prudkou explozivní reakci při náhlém uvolnění uvězněné vodní páry [Shi, 2004].



Obrázek 1-4 Granulovaná vysokopeční struska [www.emaze.com]

Strusku lze chladit i vodní parou nebo vzduchem. Pro tyto účely se užívají speciální zpěňovací žlaby, do kterých se žhavá struska nalévá přes nalévací žlab přímo ze struskové pánve. Jedná se o proces obdobný chlazení vodou, kdy se pára nebo vzduch vhnání zespodu

do žhavé strusky pod vysokým tlakem. Proudem vzduchu je struska rozfoukána do formy malých částic (3–5 mm), které dopadají do nádrže s vodou, případně na stěnu, od které se odráží na dopravní pás. Vzniklá forma má nižší objemovou hmotnost, což je způsobeno pórovitostí výsledné struktury. Toho je užíváno například při produkci expandované strusky, která může být využita jako kamenivo do lehčeného betonu [Drochytka & Matulová, 2009].

Ocelářské strusky lze chladit buď pasivně vzduchem, přičemž i zde nastává problém se silikátovým rozpadem, případně metodami kombinujícími výše zmíněné procesy. Například lze strusku rozprostřít na vrstvu silnou 40–100 mm, která je poté chlazená vzduchem po dobu 4 minut. Následuje postřik vodou po dobu 20 minut, který strusku ochladí na teplotu přibližně 500 °C. Poté je struska transportována do další stanice, kde následuje další 4 minutový postřik a ochlazení až na teplotu 200 °C, čímž je minimalizována šance, že dojde k zachycení vody ve žhavé strusce a explozi vodní páry. Výsledná struska má obdobnou formu jako vysokopecní struska chlazená vzduchem, s částicemi velikosti 30–40 mm [Shi, 2004].

1.3 Hydraulická reaktivita strusek

Mnoho faktorů může ovlivnit hydraulickou reaktivitu strusky. Chemické složení, sklovitost a jemnost jsou faktory tzv. vnitřní, vázané na samotnou strusku [Botvinkin, 1955]. Vnější faktory tvoří například podmínky při zrání a materiál, kterým je struska aktivována. Následující kapitoly pojednávají hlavně o vlivech vnitřních faktorů.

1.3.1 Chemické složení

Chemické složení má zásadní dopad na výslednou strukturu strusky a tedy zásadně ovlivňuje její hydraulické vlastnosti. Pro snadné posouzení těchto vlastností bylo navrženo několik různých hydraulických modulů. Moduly uvedené v tabulce (Tabulka 1-2) jsou určeny specificky pro granulovanou vysokopecní strusku při užití strusky jako částečné náhrady cementu. Moduly lze zařadit do třech základních typů.

Typ I uvažuje pouze hlavní složku SiO_2 ve strusce. Nejčastěji užívaným modulem je z tohoto typu K_3 , například pro Evropu platí požadavek $K_3 > 1,0$, v Japonsku pak $K_3 > 1,4$. Modul K_7 byl navržen na základě 28-denních pevnostech strusky s vysokým obsahem MgO . Typ II uvažuje vliv minoritních složek ve strusce jako CaS , BaO , TiO a FeO . Typ III je od předchozích dvou odlišný v tom, že vliv Al_2O_3 uvažuje jako nepříznivý.

Při laboratorních experimentech se syntetickými struskami, bez ohledu na podmínky zrání a typ aktivátorů, strusky s obsahem 15–20 % Al_2O_3 a 40–50 % CaO vykazovaly nejvyšší pevnosti. S klesajícím obsahem těchto složek klesá i pevnost cementů. Ukázalo se také, že nahrazení 5–20 % oxidu vápenatého oxidem hořečnatým nemá zásadní vliv na výslednou pevnost [Shi et al, 2006].

Type	Hydraulic index	
I	$K_1 = 100 - \text{SiO}_2$	$K_2 = \frac{100 - \text{SiO}_2}{\text{SiO}_2}$
	$K_3 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$K_4 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 10}{\text{SiO}_2}$
	$K_5 = \frac{\text{CaO} + 1.4\text{MgO} + 0.6\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	$K_6 = \text{CaO} + 0.5\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 2.0\text{SiO}_2$
	$K_7 = \frac{6\text{CaO} + 3\text{Al}_2\text{O}_3}{7\text{SiO}_2 + 4\text{MgO}}$	
II	$K_8 = \frac{\text{CaO} + 0.5\text{MgO} + \text{CaS}}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$	$K_9 = \frac{\text{CaO} + 0.5\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{FeO} + (\text{MnO})^2}$
	$K_{10} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{BaO}}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$	$K_{11} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{TiO}_2}$
III	$K_{12} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + 0.3\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + 0.7\text{Al}_2\text{O}_3}$	$K_{13} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + 0.5\text{Al}_2\text{O}_3}$

Tabulka 1-2 Hydraulické moduly strusky [Smolczyk 1978, 1980, Shi 1987]

1.3.2 Skelná fáze

Hydraulická reaktivita granulované vysokopecní strusky je také důsledkem neuspořádané sklovité struktury, která zajišťuje dostatečný obsah vnitřní energie. Podíl skelné fáze by tedy měl mít rozhodující roli na tyto vlastnosti. Navzdory tomu se závěry různých studií na toto téma neshodují. Ve studii z roku 1963 [Schwiete & Dolbor, 1963] byly testovány strusky chlazené různým způsobem a konečný závěr byl, že třídní pevnosti lineárně korespondují obsahu skla ve strusce a že přijatelný obsah skla je 30–40 %. Naproti tomu v roce 1980 [Demoulian et al., 1980] bylo zjištěno, že se pevnost cementu zvyšuje až do obsahu skelné fáze 95 %, poté s dalším navýšením klesá. V této studii je také zmíněn přípustný obsah skelné fáze pod 70 %. V předchozích studiích [Budnikov & Groshkov, 1965; Botvinkin 1955] bylo pro změnu

závěrem, že strusky s obsahem skelné fáze 40 % vykazovaly vyšší hydraulickou reaktivitu než strusky s obsahem skelné fáze 80 %. Další studie, z roku 1973 [Coale et al., 1973], doporučuje minimální podíl skelné fáze 85 %.

Je tedy patrné, že toto téma není zcela objasněno a většina norem ve světě neudává minimální obsah skelné fáze ve strusce pro užití s cementem. Výjimkou je Velká Británie, kde je požadavek na obsah skelné fáze minimálně 90 %. Jedna z teorií [Smolczyk, 1980] je, že přítomnost jemně rozptýlených krystalů nemá rozhodující vliv na pevnost, protože tyto krystaly budou částečně nebo úplně obklopeny reaktivním sklem a to i při namletí na jemnost ekvivalentní cementu. Podobný závěr měla i další studie z roku 1980 [Demoulian et al., 1980], a to, že tyto krystaly by dokonce mohli reaktivitu zvyšovat.

1.3.3 Hydratace strusky

Stupeň hydraulické aktivity je krom podílu sklovité fáze ovlivněn rovněž poměrem Al_2O_3 k MgO v dané strusce, přičemž při více než 5 % obsahu MgO se aktivita strusky snižuje, zatímco svého maxima dosahuje při 20 % obsahu Al_2O_3 . Mletím na vyšší jemnost se hydraulická aktivita strusky také zvyšuje. Hydratace strusky s převahou skelné fáze probíhá velmi nesnadno. Při kontaktu s vodou dochází na povrchu obsažených křemičitano-hlinito-vápenatých skel k tvorbě tenké vrstvy křemičitého gelu, jenž brání dalšímu pronikání molekul vody do jádra, z něž je zapotřebí uvolnit dostatečné množství vápna pro vznik hlavních pojivových struktur, tedy hydrátů křemičitanů a hlinitanů vápenatých. Z tohoto důvodu je možné krystalizační proces uměle podpořit tzv. aktivací strusky, kterou je možno realizovat dvojitým způsobem.

- Principem zásaditého (alkalického) buzení je vytvoření přesyceného roztoku s dostatečně vysokou koncentrací hydroxylových iontů, a to přidavkem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, případně NaOH , v důsledku čehož dochází k rozpadu struktury skla a krystalizaci hydrosilikátů a hydroaluminátů.
- Při síranovém buzení je aktivátorem sádrovec, který při dostatečném obsahu hlinitanové složky v roztoku s touto reaguje za vzniku ettringitu (AF_t -fáze), který se působením přebytku vápna z části přeměňuje na monosulfát (AF_m -fáze).

Průběh hydratace pak tedy závisí nejen na druhu a koncentraci budících iontů a složení strusky, ale rovněž na tvaru a velikosti jejích zrn, tak jako na uvolněném reakčním teple či teple uměle dodaném prostředím [Hlavinková, 2012].

1.4 Užití metalurgických strusek

Vzhledem k faktu, že je struska nezbytným ale také nechtěným produktem při výrobě železa a oceli, je její potenciální využití důležité pro udržitelný rozvoj metalurgického průmyslu. Nelze zpochybnit pozitivní dopad minimalizace množství odpadních materiálů produkovaných jedním z největších průmyslových odvětví. Momentálně struska nachází nejvíce využití zejména právě ve stavebnictví, a to v několika různých podobách.

1.4.1 Zpracování surového produktu

Po ochlazení strusky jsou z ní obvykle magneticky odstraněny kusy surového železa a oceli, které se vracejí zpět do výroby. Obsah takto oddělených železných částic může být až 15 % [Monshi & Asgarani, 1999]. Odstranění zbytkového železa je prováděno u všech forem metalurgických strusek. Další zpracování se liší dle formy dané strusky. Strusky určené jako agregát do betonu, obvykle jako částečná nebo úplná náhrada kameniva jsou drceny a výsledný produkt je roztríděn dle frakcí. Strusky určené jako příměs do cementu jsou drceny a následně mlety na požadovanou jemnost, obvykle srovnatelnou s jemností běžného cementu nebo vyšší. Strusky určené na výrobu portlandského cementu nemusejí být zvlášť upravovány před užitím ve výrobě.

1.4.2 Struska jako náhrada kameniva

Nejjednodušší využití surové strusky je přímo jako kamenivo do betonu. Lze takto využít strusky, které nejsou vhodné jako náhrada cementu, protože svým složením neodpovídají požadavkům na hydraulické pojivo, obvykle tedy pomalu chlazené strusky. Často jsou takto užívány zpěněné strusky, tj. strusky chlazené vodní parou případně tlakovou vodou ve žlabech, produkujících strusku s pórovitou strukturou. Při využití této strusky jako kameniva je nutno monitorovat zejména velikost pórů, konkrétně hlavně otevřených pórů na povrchu zrn. Struska s většími póry má například v surovém stavu sice menší objemovou hmotnost, pro zaplnění těchto pórů je ale potřeba více pojiva a výsledný beton má tedy vyšší spotřebu cementu, vyšší objemovou hmotnost a nižší pevnost v tlaku [Drochytka & Matulová, 2009].

Při použití ocelářské strusky je vhodné provést pouze částečnou náhradu kameniva struskou, aby bylo zabráněno přílišnému nárůstu hmotnosti betonu. Betony s tímto agregátem nevykazují žádné negativní vlastnosti oproti betonům s běžným kamenivem, a to jak ve fázi zpracování, tak po zatuhnutí [Monosi et al, 2014].

1.4.3 Směsné cementy

Jednou z možností je užití strusky jako příměsi při výrobě směsného cementu. Mletá struska se míchá se slínkem na konci výrobního procesu portlandského cementu. Pro optimální výsledky by struska použitá na výrobu těchto cementů měla mít modul zásaditosti (M_b) mezi 0,7 a 1,2 a obsah sklovité fáze alespoň 70 % hmotnosti.

$$M_b = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (1-I)$$

Vzniklý produkt se je označen dle obsahu strusky buď jako směsný cement CEM II A/B, při obsahu 6–35 %, nebo jako vysokopecní cement CEM III A/B/C při obsahu 36–95 %. Se zvyšujícím se obsahem strusky stoupá chemická odolnost betonu, snižuje se ale hydratační teplo a tedy i počáteční pevnost v tlaku. Vysokopecní cementy jsou vhodné například na stavbu základů nebo přehrad, kde počáteční pevnost v tlaku není natolik kritickým faktorem a chemická odolnost je žádaným parametrem.

V současné době jsou na výrobu směsných cementů užívány téměř výhradně vysokopecní strusky, existují ale i studie na potenciální využití ocelářských strusek pro tyto účely. Problémem ocelářských strusek v tomto aspektu je fakt, že sice obsahují C_3S , C_2S , C_4AF a C_2F , což podporuje jejich cementové vlastnosti, obsah C_3S je ale podstatně nižší, než je tomu u vysokopecních strusek. Alternativou je využití ocelářské strusky přímo při produkci portlandského slínku. Výsledné složení musí splňovat stejná kritéria jako běžný portlandský slínek, čehož lze docílit vhodným poměrem vápence, písku, jílu a bauxitu vzhledem k chemickému složení dané strusky [Tsakiridis et al., 2007].

1.4.4 Izolační materiál

Vysokopecní strusku lze využít při výrobě skelných minerálních izolací, v tomto případě nahrazuje běžněji užívaný čedič či diabas. Vyrábí se stejným způsobem, roztavením vstupních materiálů na vysokou teplotu společně s přísadami jako tmelící látky (různé polymery)

a olejem, který minimalizuje prášivost. Pomocí rotačních bubnů je poté směs protlačena otvory o průměru 2–6 μm a chladne ve formě vláken. Minerální izolace mají krom nízkých součinitelů vodivosti i relativně vysokou požární odolnost.

Alternativní užití najdeme při výrobě žáruvzdorného betonu, kde je drcená nebo granulovaná struska použita jako agregát. Struska má teplotní roztažnost přibližně $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [Commission of the European Communities, 1981], tedy velmi podobnou běžné betonářské oceli, čímž se minimalizuje napětí vznikající mezi betonem a výztuží při vzrůstající teplotě a tedy vzrůstá požární odolnost. Nárůst odolnosti činí až 30 % oproti běžnému betonu [National Slag Association, 2016].

1.4.5 Alkalicky aktivovaná pojiva a geopolymery

Dalšími z možných využití strusky jsou alkalická pojiva a geopolymery, u kterých je portlandský cement zcela nahrazen struskou. V následujících dvou kapitolách budou tato témata probrána více do hloubky.

1.5 **Alkalicky aktivovaná strusková pojiva**

Portlandský cement je v současnosti nejrozšířenějším stavebním materiálem, přičemž v roce 2015 celosvětová produkce dosáhla 4,2 miliardy tun. V roce 2000 bylo toto číslo „pouhých“ 1,6 miliardy tun. Dramatický nárůst světové produkce je z velké části způsoben vývojem v Číně, kde nárůst produkce v tomto období činil téměř 2 miliardy tun. Jednou z alternativ portlandského cementu jsou právě alkalicky aktivované cementy.

Alkalickou aktivací je nazýván chemický proces, který transformuje sklovité struktury (částečně nebo úplně amorfní) na velmi kompaktní kompozity [Palomo et al., 1998]. Vhodné materiály pro tento proces jsou právě strusky a teplárenský popílek, které jsou zejména v Asii produkovány ve velkém množství. Jejich využití by tedy mohlo mít zásadní pozitivní dopad na životní prostředí, které je výrobou portlandských cementů značně zatěžováno.

1.5.1 Alkalické aktivátory

Obvykle jsou jako aktivátory užívány žíravé louhy nebo alkalické soli. Celkem lze tyto aktivátory zařadit do šesti skupin [Glukhovskiy et al. 1980]:

- Žíravé louhy: MOH (např. NaOH).
- Nesilikátové soli slabých kyselin: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_2PO_4 , MF (např. Na_2CO_3).
- Silikáty: $M_2O \cdot nSiO_2$ (např. $Na_2O \cdot nSiO_2$).
- Hlinitany: $M_2O \cdot nAlO_3$.
- Hlinitan-silikáty: $M_2O \cdot nAlO_3 \cdot (2-6) SiO_2$.
- Nesilikátové soli silných kyselin: M_2SO_4 (např. Na_2SO_4).

Z těchto látek jsou nejdostupnější NaOH, Na_2CO_3 , $Na_2O \cdot nSiO_2$ (vodní sklo) a Na_2SO_4 . Z chemického hlediska je hydratace chemická reakce mezi vodou a cementem. U alkalicky aktivovaných pojiv je hydratace reakcí mezi pojivem a vodou za přítomnosti příslušného aktivátoru. Aktivátory lze do systému přidat třemi různými způsoby: Rozpuštěním ve vodě, rozemletím společně se struskou případně dodatečným smícháním mleté strusky s aktivátorem.

1.5.2 Mechanismus hydratace

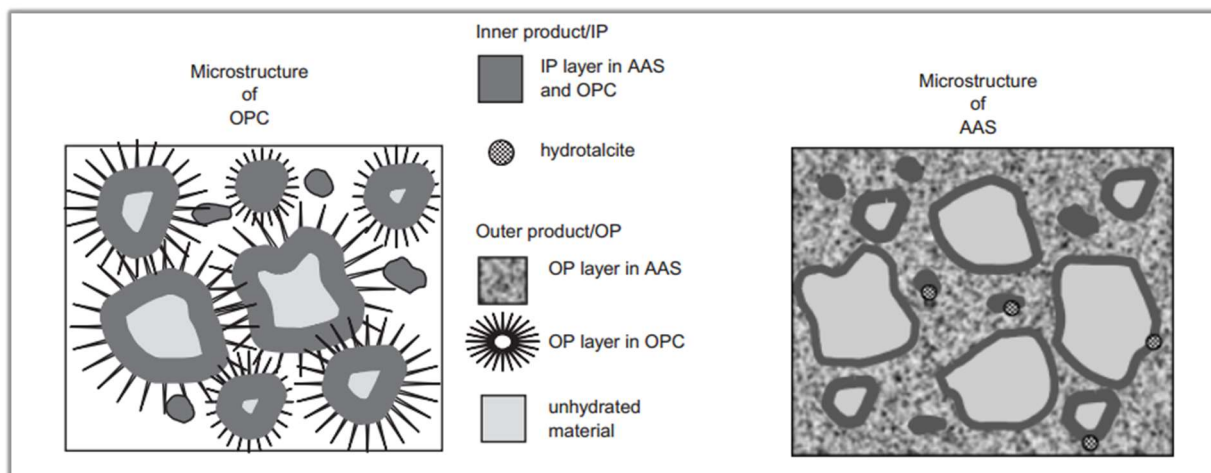
Přesný reakční mechanismus hydratace alkalicky aktivovaných pojiv, který by vysvětlil sedání a tvrdnutí těchto pojiv není zcela pochopen, je však předpokládáno, že je závislý jak na základním materiálu, tak aktivátoru. Jednou z interpretací je, že se mechanismus skládá z propojených reakcí destrukce a kondensace, které zahrnují rozpad základního materiálu na nestabilní strukturní jednotky, jejich interakci s koagulačními strukturami a vytvoření kondenzačních struktur. První krok se skládá z rozpadu kovalentních vazeb Si-O-Si a Al-O-Si, k čemuž dochází při zvýšení pH alkalického roztoku a tyto skupiny jsou transformovány na koloidní fázi. Poté dojde k akumulaci rozpadlých produktů, které společně vytvoří koagulovanou strukturu, což vede k třetí fázi kdy je generována kondenzovaná struktura [Glukhovskiy et al. 1980]. Ostatní studie souhlasí s tím, že se tyto tři fáze v procesu vyskytují, problém je, že probíhají téměř současně a jejich analýza je tedy velmi obtížná [Pacheco-Torgal et al., 2007].

1.5.3 Vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových malt

Zpracovatelnost těchto malt je závislá na povaze strusky a aktivátoru, množství aktivátoru, jemnosti strusky, přísadách i času, kdy byly přísady přidány. Obecně lze říct, že je viskozita vyšší, než u běžných malt z portlandských cementů.

Na sedání mají vliv zejména aktivátory a jemnost mletí strusky. Ve studii z roku 1987 Andersson a Graham ukázali, že při nárůstu jemnosti z 350 na 530 m²/kg se čas sedání prodloužil nebo zůstal konstantní, zatímco při nárůstu z 530 na 670 m²/kg se čas dramaticky zkrátil a to až na desetinu původní hodnoty. Čas sedání se také zkracuje se vzrůstající zásaditostí strusky bez ohledu na druh aktivátoru. Sedání lze výrazně ovlivnit přísadami, například NaCl nebo kyselinou jablečnou. Brough et al. (2000) ukázali, že přidáním 1 nebo 4 % NaCl se čas sedání oproti kontrolní směsi snižuje z 5 na 2,5 resp. 4 hodiny, zvýšení obsahu na 8 % naopak tento čas prodlužuje na 12 hodin. Kyselina jablečná má ještě důraznější efekt, kdy 0,5 % objemu prodlužuje tento čas na 22 hodin [Shi et al., 2006].

Pevnost v tlaku alkalicky aktivovaných malt je u 28-denních pevností obdobná portlandskému cementu, jejich počáteční nárůst pevnosti je však výrazně odlišný. Obecně lze říci, že jejich pevnost narůstá nejvíce během prvního dne, poté se nárůst pevnosti podstatně zpomalí, v některých případech dokonce zastaví. Pravděpodobnou příčinou je zde odlišný mechanismus hydratace. Počáteční hydratace je charakteristická vysokou reaktivitou Na-metasilikátu a relativně rychlým rozpouštěním nejmenších částic strusky (<2 μm) což vede k vytvoření gelové C-S-H fáze, která po prvním dnu téměř zcela zaplní prostor pórů ve směsi. U běžného cementu bez aktivátoru dochází k vytvoření C-S-H jehlovitých krystalických struktur, které tento prostor zaplňují postupným růstem, což způsobuje jejich pomalejší nárůst pevnosti (Obrázek 1-5). Po několika dnech jsou jemné částice strusky zcela spotřebovány a následující nárůst pevnosti je závislý na větších a pomaleji rozpustných částicích strusky, proto se nárůst pevnosti po prvních dnech dramaticky zpomalí [Gruskovnjak et al., 2006].



Obrázek 1-5 Mikroskopická struktura hydratace - vlevo běžný cement, vpravo alkalicky aktivované pojivo [Shi et al., 2006]

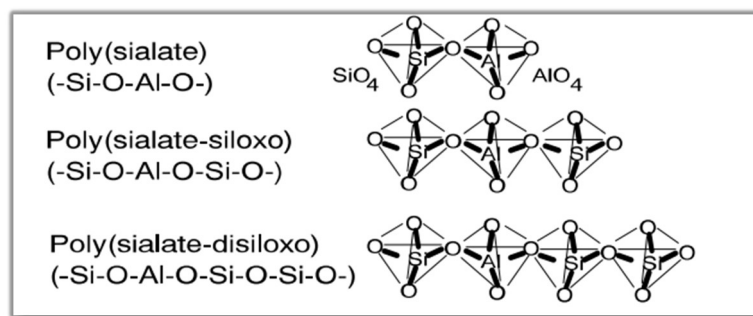
Smrštění je u těchto malt obecně výraznější, než je tomu u portlandského cementu, což je jednou z příčin jejich relativně obtížného uplatnění. Bylo však ukázáno, že lze využít přísad k minimalizování smrštění bez zásadního zásahu do pevnosti výsledného betonu. Přísadami zde mohou být například anhydrit a nehašené vápno, které při 8 % obsahu ve směsi mohou redukovat smrštění od vysychání až na 25 % původní hodnoty [Yuan et al., 2014].

1.6 Geopolymery

Geopolymery jsou dalším z možných využití strusky. Téma geopolymérů úzce souvisí s alkalicky aktivovanými pojivy. Liší se od nich ale jak strukturou, tak fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Lze říci, že je se jedná spíše další vývojový stupeň alkalicky aktivovaných pojiv. Geopolymery jsou širokým pojmem, tato kapitola se tedy bude zabývat pouze o geopolymery založenými na bázi křemíku a hliníku. Pro tyto geopolymery byl navržen termín poly(sialáty).

1.6.1 Princip geopolymérů

Geopolymery, někdy také nazývány anorganickými polymery, jsou minerální polymerické materiály, jejichž vnitřní struktura je trojrozměrná, což je zásadní rozdíl oproti alkalicky aktivovanému pojivu, kde tato struktura chybí. V této struktuře tvoří křemík, hliník a kyslík řetězec SiO_4 a AlO_4 tetraedrů střídavě propojených sdílenými atomy kyslíku. U amorfních nebo semi-amorfních geopolymérů lze dle pořadí těchto tetraedrů lze geopolymery dělit do tří typů [Davidovits, 1994].



Obrázek 1-6 Tři typy struktury geopolymérů – PS, PSS, PSDS [Davidovits, 1994]

Výsledná trojrozměrná struktura je závislá na tomto uspořádání. Struktura je doplněna kationty (K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+), které vyvažují negativní náboj Al^{3+} v tetraedrálním uspořádání. Empiricky lze strukturu zapsat jako: $M_n \{-(SiO_2)_z-AlO_2\}_n, wH_2O$, kde M_n je kation, n je stupeň polykondenzace a z je 1, 2, 3 dle typu struktury [Davidovits, 1994]. Pro dosažení této struktury je potřeba základní materiál, který je rozpuštěn ve vysoce zásaditém prostředí například roztoku NaOH či KOH. Základním materiálem je v dosavadních aplikacích obvykle metakaolin, využití ostatních, více dostupných křemičito-hlinitých materiálů (např. strusky nebo popílek) je tedy vhodným tématem pro další výzkum [Majidi, 2009].

1.6.2 Vlastnosti geopolymérů

Jednou z hlavních pozitivních mechanických vlastností geopolymérů je jeho trvanlivost. Betony na principu geopolymérů vykazují vynikající chemickou odolnost, vysokou pevnost v tahu i tlaku, relativně vysoký nárůst pevnost a minimální smrštitivost. Některé studie poukazují na vyšší počáteční nárůst pevnosti, než je tomu u běžného cementu, záleží zde však na vstupních podmínkách, zejména na teplotě při tvrzení betonu.

1.7 Normy

1.7.1 ČSN EN 15167-1

Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Norma je verzí evropské normy EN 15167-1:2006. Určuje požadavky na chemické a fyzikální vlastnosti a na postupy systému řízení mleté granulované vysokopecní strusky určené k použití jako příměs typu II do výrobků z betonu, malt a injektážních malt. Norma neupravuje použití této strusky ve výrobě betonu, malty nebo injektážní malty [ČSN EN 15167-1, 2006].

1.7.2 ČSN EN 15167-2

Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Hodnocení shody. Verze evropské normy, která určuje postup hodnocení shody mleté granulované vysokopecní strusky s EN 15167-1, včetně certifikace shody certifikačním orgánem. Norma zahrnuje technická pravidla pro řízení výroby výrobcem, včetně zkoušek vlastní kontroly vzorků, a pro úkoly certifikačního orgánu. Uvádí rovněž pravidla pro činnosti, které je třeba dodržovat v případě neshody, postup pro certifikaci shody a požadavky na distribuční střediska [ČSN EN 15167-2, 2006].

1.7.3 ČSN 72 2009

Struska vysokopecní granulovaná. Zkoušení. Původní česká norma na vysokopecní strusku. Platná od roku 1974. Zrušena v roce 2002 bez náhrady.

1.7.4 ČSN EN 206

Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Byla vydána v červnu 2014 s platností od 1. 7. 2014. Norma určuje pravidla pro používání betonů a jejich složek. Upravuje použití strusky při výrobě cementu a betonů, které není zahrnuto v normě ČSN EN 15167.

1.8 Environmentální dopady

Metalurgický průmysl je největším spotřebitelem energie ze všech výrobních odvětví. Zároveň má největší podíl na světové ekonomice. Struska, jakožto odpadní produkt tohoto průmyslu je tedy jedním z nejobjemnějších odpadů z celého výrobního průmyslu. Dodatečné využití této suroviny má tedy kritický dopad jak na ekonomiku, tak životní prostředí. Vzhledem k rozhodující roli Asie ve světové produkci železa a oceli není překvapivé, že výzkum i praktické využití této suroviny je nejintenzivnější právě v Číně a Japonsku.

1.8.1 Objem světové produkce

Následující údaje jsou statistiky uváděné institucí World Steel Association. V roce 2015 činila celosvětová produkce surového železa 1153 milionů tun, z čehož 891 milionů bylo vyrobeno v Asii. Čína vyprodukovala 691 milionů tun, což je více než polovina světové produkce. V České Republice se ve stejném období vyrobily 4 miliony tun.

Ve stejném období bylo vyprodukováno 1599 milionů tun surové oceli, z toho 1096 milionů tun v Asii. I zde má Čína zásadní podíl a to 803 milionů tun, mírně přes 50 % světové produkce. Na Českou Republiku připadalo 5,26 milionů tun.

Odhadnout celkové množství produkované strusky je komplikované. Produkce strusky při výrobě železa záleží na kvalitě použité rudy. Při použití rudy s obsahem železa 60–66 % připadá na tunu surového železa přibližně 0,25–0,3 tuny strusky. Méně kvalitní rudy produkují více strusky, a to až 1–1,2 tuny. Při výrobě oceli je množství vyprodukované strusky nižší. Závisí sice na vstupních materiálech a typu pece, obecně ale lze uvažovat přibližně 0,2 tuny na tunu vyrobené oceli. Přibližně polovina této hmotnosti je tvořena zbytkovým železem, které je z ní po vychladnutí odstraněno a vráceno do produkce. Lze tedy bezpečně uvažovat hmotnost strusky jako 10–15 % celkové hmotnosti produkované oceli. [Van Oss, 2002]. Odhady za rok 2014 činí 310–370 milionů tun vysokopeční strusky a 170–250 milionů tun ocelářských strusek. Přesnější čísla nejsou k dispozici [Van Oss, 2014].

1.8.2 Ekologie výroby

Výroba železa a oceli je největší zdroj emisí CO₂ ze všech průmyslových odvětví, což vyplývá z vysoké energetické náročnosti výroby a používaného paliva, kterým je z převážné části koks a ostatní fosilní paliva. Nejnižší emise mají elektrické obloukové pece, přibližně 0,4 tuny CO₂ na tunu oceli. Vysoké pece a kyslíkové pece mají emise srovnatelné, kolem 1,6-1,7 tuny CO₂ na tunu železa, resp. oceli. Budeme-li tedy pro případ vysoké pece uvažovat 0,3 tuny strusky na tunu produkovaného železa, přibližně 0,4 tuny CO₂ připadá právě na produkci strusky.

Při produkci výroby jedné tuny portlandského slínku je vyprodukována přibližně jedna tuna odpadního CO₂. Oproti vysokopecní strusce je tato hodnota více než dvojnásobná. Nahrazením jedné poloviny slínku struskou by znamenalo snížení emisí na tunu cementu o více než 40 %. Pokud jde o minimalizaci emisí, měli bychom se snažit strusku v cementu využít v co nejméně upraveném stavu.

Dalším hlediskem je energetická náročnost výroby portlandského cementu. Výroba cementu spotřebuje 84 % energie spotřebované v celém sektoru výroby nekovových minerálů. Dle typu produkce výroba cementu spotřebuje 3,2-6,0 GJ energie na tunu vyrobeného cementu. Zásadní rozdíl je mezi použitím mokrého nebo suchého výpalu, protože u mokrého výpalu je velká část energie spotřebována na výpar vody ze vstupních surovin. Celosvětová spotřeba energie na výrobu cementu činí přibližně 9×10^{19} J ročně [Taylor et al, 2006].

2 Cíle práce

Katedře mechaniky Fakulty Stavební ČVUT v Praze byly poskytnuty dva vzorky strusky. Cílem této práce je prozkoumat možnosti uplatnění těchto surovin, a to na teoretické úrovni v rešerši a na úrovni praktické provedení základních experimentů, které mohou sloužit jako základ pro další výzkum.

V experimentální části byly vyrobeny a zkoumány vzorky malty s různým poměrem běžného cementu a strusky bez dalších přísad. Vodní součinitel všech vzorků byl konstantní. Prvotním cílem bylo získat hodnoty s minimálním množstvím proměnných vstupních dat, se kterými lze srovnat výsledky případných dalších zkoušek při eventuálním následném výzkumu.

Pro nedestruktivní měření Youngova modulu pružnosti vzorků byly použity tři různé metody a to měření rychlosti šíření ultrazvukových vln, měření vlastní frekvence podélného kmitání a měření vlastní frekvence příčného kmitání za ohybu. Dalším cílem bylo data získaná z těchto tří měření porovnat a vyhodnotit.

Cílem bylo také prozkoumat vliv obsahu strusky na vlastnosti malty během prvního měsíce od vyrobení pomocí nedestruktivních metod měření mechanických a fyzikálních veličin během fáze zrání vzorků. Po 28 dnech zrání byly vzorky testovány destruktivní metodou a jejich finální mechanické vlastnosti zaznamenány. Výsledkem práce je vyhodnocení těchto vlastností a zvážení ostatních možností využití těchto surovin, případně vhodná témata dalšího výzkumu.

3 Metodika

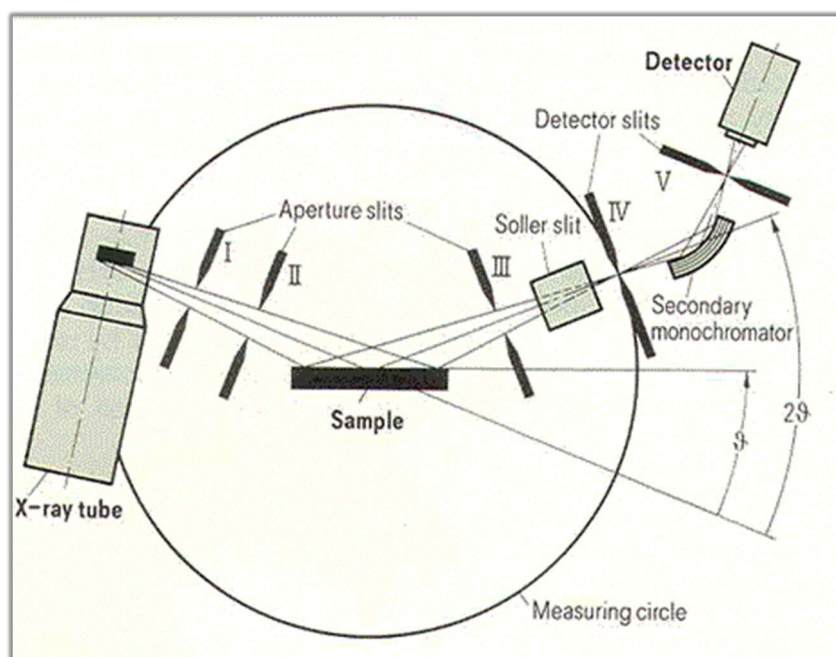
V této kapitole bude popsána metodika provedení experimentů, popis vstupních materiálů a prováděných měření. Úspěšnost a závěry měření budou vyhodnoceny v kapitole 4. Výsledky.

3.1 Materiály

Vzorky byly vyrobeny ze třech složek: strusky, cementu a vody. Fakultě byly poskytnuty dva vzorky strusky. Obě strusky byly upraveny pomocí vysokorychlostního mletí. Přesný původ těchto vzorků nebyl autorovi této práce v době psaní znám, jejich označení je tedy pouze orientační, a to struska ocelářská, dále značena „K“ a struska vysokopecní, dále značena „O“. V následujících kapitolách jsou popsány dostupné informace o těchto materiálech.

3.1.1 XRD analýza strusek

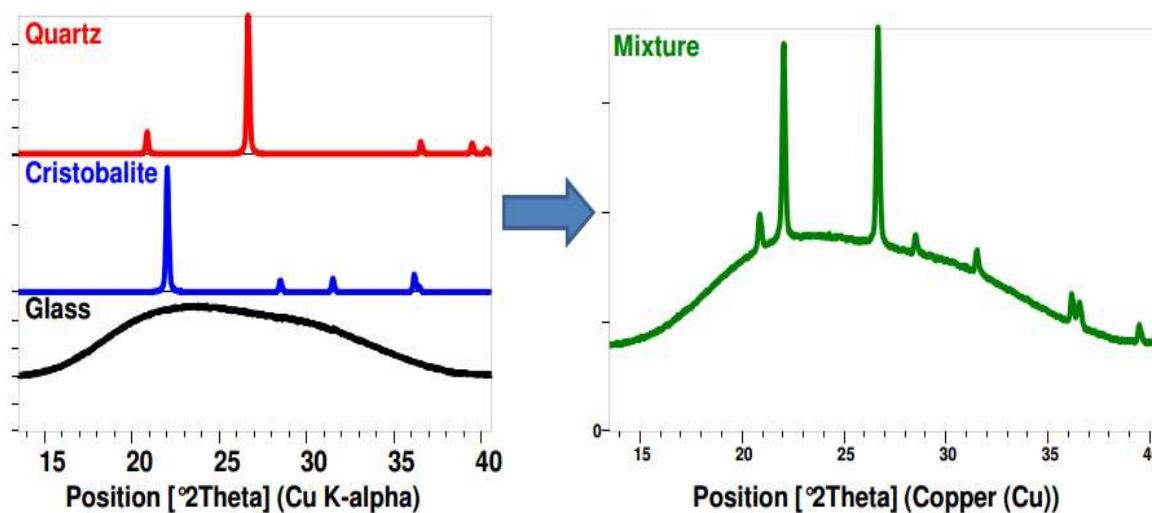
U obou strusek byla provedena analýza rentgenovou difrakční krystalografií (XRD) s cílem určit složení těchto strusek. Při této metodě je použit monochromatický paprsek rentgenového záření procházející testovanou látkou (viz schéma – Obrázek 3-1). Při průchodu látkou dochází k pružnému ohybu paprsků, tzv. difrakci, kdy směr a intenzita difraktujících paprsků závisí na vnitřní struktuře vzorku. Odchyly jsou snímány a zaznamenány. Každá minerální struktura produkuje specifický vzor vrcholů grafu.



Obrázek 3-1 Schéma XRD analýzy [ksanalytical.com]

Vzorky byly analyzovány práškovou analýzou, kde je kvůli absenci pravidelné struktury analyzována pouze závislost intenzity difraktovaného záření na úhlu mezi primárním a difraktovaným paprskem. Produktem analýzy je refrakční záznam. Z tohoto záznamu nelze přímo určit strukturu vzorku, lze však ověřit, zda odpovídá již dříve určené struktuře. Referenční struktury jsou proloženy se získaným refrakčním obrazcem tak, aby dohromady odpovídaly vrcholům v grafu, čímž je určeno, jaké minerály se ve vzorku nacházejí. Výsledky jsou pouze semi-kvantitativní a nelze z nich určit přesný poměr jednotlivých složek, pouze lze dle intenzity vrcholů jednotlivých vzorů lze odhadnout, které složky jsou ve vzorku dominantní.

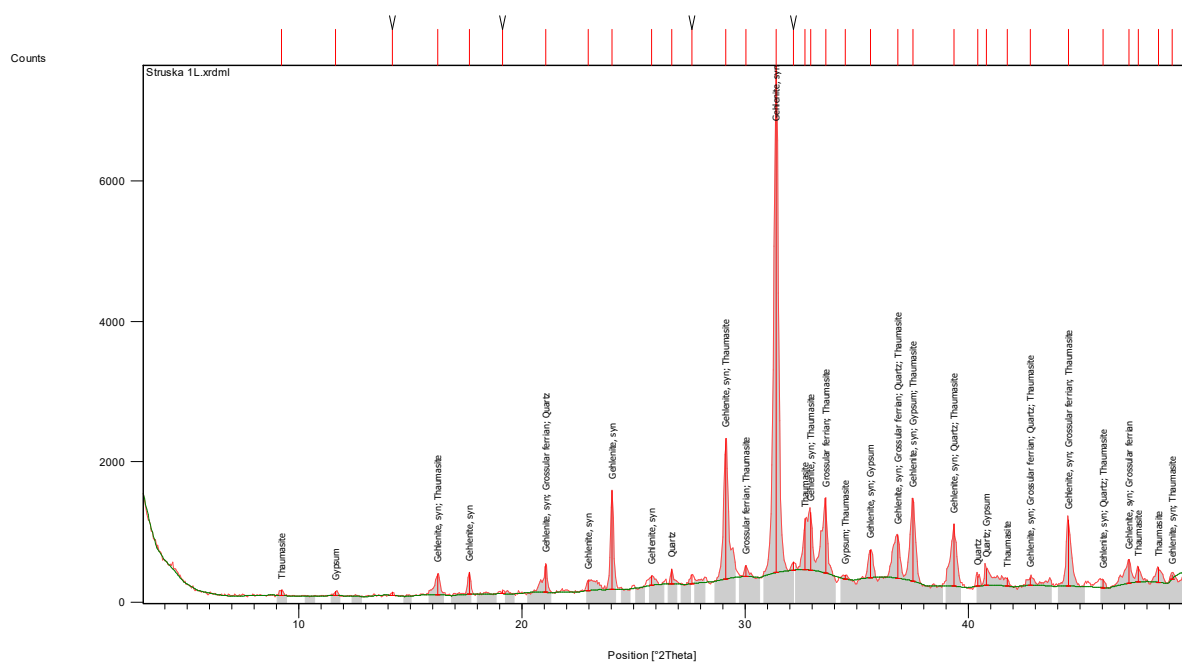
Nepravidelná sklovitá struktura produkuje tvar plynulé křivky bez vrcholů. V refrakčním obrazci lze tuto strukturu identifikovat ve spodní části grafu (Obrázek 3-2). Podíl sklovité složky lze přibližně z obrazce také určit, jsou k tomu ale za potřebí referenční vzorky se známým obsahem skla, které u této studie nebyly k dispozici.



Obrázek 3-2 Příklad skládání jednotlivých vzorů do výsledné refrakční křivky [prism.mit.edu/xray/]

Struska K

Výsledkem XRD analýzy vzorku ocelářské strusky K je refrakční křivka (Obrázek 3-3) a shrnutí nalezených vzorů (Tabulka 3-1). Pro větší verzi refrakční křivky viz příloha 1. Z výsledku je vidět, že hlavními identifikovanými krystalickými strukturami jsou zde gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$) a železitý grosulár ($\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)_3$). Méně dominantní jsou zde krystaly křemene, sádry a thaumasitu. Zastoupení těchto tří minerálů je však nevýrazné, může se jednat i o chybu v měření. Poslední složkou patrnou z výsledků je skelná fáze, která je zřetelně vidět ve spodní části grafu. Gehlenit lze ve strusce očekávat, společně s akremanitem tvoří melilit, který u strusek běžně představuje až 90 % jejich složení. Železitý grosulár je však minerál, který se ve strusce obvykle nachází pouze ve stopovém množství. Relativně dominantní zastoupení tohoto minerálu by zde tedy mohlo mít alternativní vysvětlení, jeho chemické složení však jeho výskyt nevylučuje.



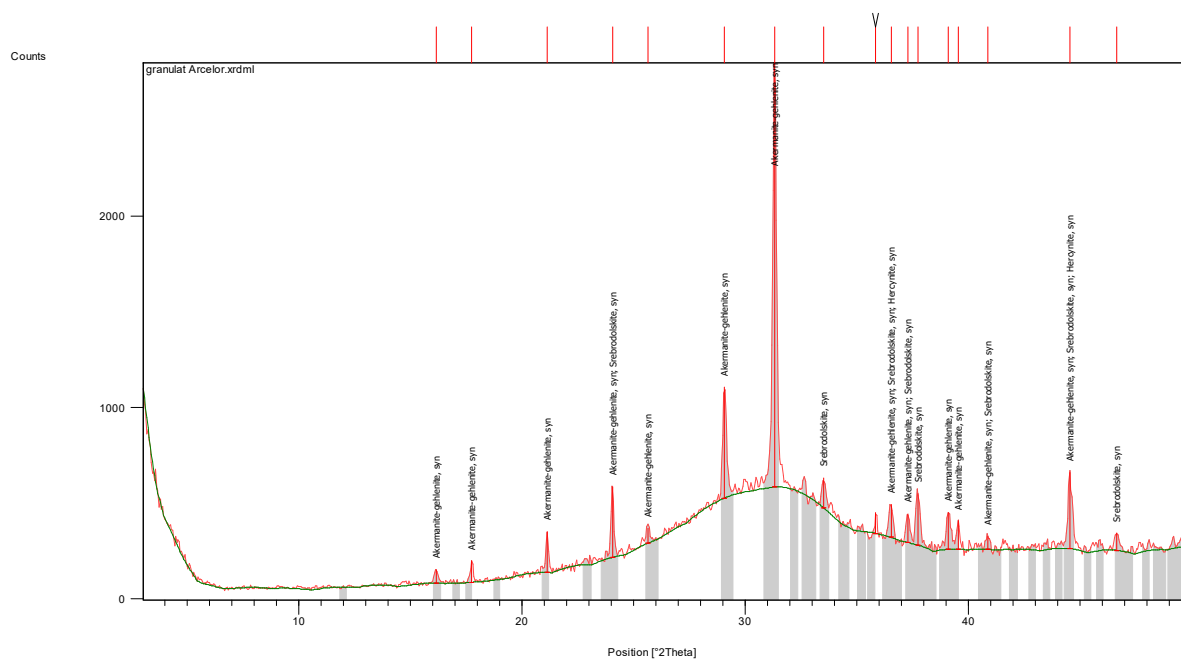
Obrázek 3-3 Výsledná refrakční křivka XRD analýzy proložená referenčními vzory – Struska K

Ref. Code	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-087-0968	Gehlenite, syn	57	23	1.000	64
01-085-1369	Grossular ferrian	27	18	0.137	29
01-082-0511	Quartz	20	7	0.041	2
00-003-0044	Gypsum	8	16	0.024	2
01-075-1688	Thaumassite	12	51	0.034	3

Tabulka 3-1 Závěr XRD analýzy vzorku K

Struska O

Výsledkem XRD analýzy vzorku vysokopecní strusky O je refrakční křivka (Obrázek 3-4) a shrnutí nalezených vzorů (Tabulka 3-2). Pro větší verzi refrakční křivky viz přílohu 2. U tohoto vzorku je jednoznačně dominantní složkou identifikován ackermanit-ghelilit. Jedná se tedy s největší pravděpodobností o melilit, který lze ve strusce očekávat. V minoritním zastoupení zde byl identifikován Srebrodolskit ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$), který patří do skupiny Brownmilleritu, který se ve struskách také běžně vyskytuje. Hercynit (FeAl_2O_4) je zde opět v minoritním zastoupení. Přestože dostupná literatura o jeho výskytu ve strusce nepojednává, svým složením odpovídá chemickému složení běžné strusky. Obdobně jako u předchozího vzorku je zde patrna skelná fáze ve spodní části grafu. Přesto že se na první pohled může jevit jako výraznější, nežli tomu bylo u strusky K, je třeba zohlednit jiné měřítko vertikální osy. Nelze tedy jednoznačně říci, že zde skelná fáze tvoří větší část objemu.



Obrázek 3-4 Výsledná refrakční křivka XRD analýzy proložená referenčními vzory – Struska O

Ref. Code	Compound Name	Score	Total Lines	Scale Factor	SemiQuant [%]
01-079-2423	Akermanite-gehlenite, syn	54	24	0.960	89
01-071-2108	Srebrodolskite, syn	21	35	0.067	6
01-082-0588	Hercynite, syn	33	6	0.075	6

Tabulka 3-2 Závěr XRD analýzy vzorku O

3.1.2 Chemické složení strusek

V předcházející kapitole bylo prozkoumáno rozložení minerálů ve strusce. Ze složení těchto minerálů lze přibližně určit chemickou kompozici těchto vzorků. Výsledek této analýzy bude však pouze orientační, jelikož vychází ze semi-kvantitativních hodnot, které nezohledňují skelnou fázi strusky. Skelná fáze by se svým složením neměla od krystalické fáze dramaticky lišit. Můžeme tedy získat přibližné informace o zastoupení hlavních složek těchto vzorků, přestože stopové sloučeniny tímto způsobem zjistit nelze. V následující tabulce (Tabulka 3-3) jsou uvedena chemická složení jednotlivých minerálů.

Minerál	Složka [%]									
	CaO	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CO ₂	H ₂ O	SO ₃
Melilit	31,35	33,59	2,68	-	20,9	4,51	5,78	-	-	-
Gehlenit	40,90	21,91	-	-	37,18	-	-	-	-	-
Grosulár	37,35	40,02	-	-	22,64	-	-	-	-	-
Srebrodolskit	41,26	-	-	58,74	-	-	-	-	-	-
Hercynit	-	-	41,34	-	58,66	-	-	-	-	-
Křemen	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-
Sádra	32,57	-	-	-	-	-	-	-	20,93	46,5
Thaumasit	27,02	9,65	-	-	-	-	-	7,07	43,40	12,86

Tabulka 3-3 Chemické složení minerálů identifikovaných ve vzorcích strusky [webmineral.com, 2016]

Využitím těchto hodnot společně s procentuálním zastoupením jednotlivých minerálů (viz Tabulka 3-1 a Tabulka 3-2) získáme procentuální chemické složení krystalické fáze vzorků, které je následující:

Vzorek	Složka [%]									
	CaO	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CO ₂	H ₂ O	SO ₃
K	38,3	27,9	0,0	0,0	30,4	0,0	0,0	0,2	1,5	1,3
O	30,4	29,9	4,9	3,5	22,1	4,0	5,1	0,0	0,0	0,0

Tabulka 3-4 Chemické složení krystalických fází vzorků strusky

Obsah CaO a SiO₂ je v obou případech typický pro oba typy strusky. Netypické jsou zejména zvýšené hodnoty sloučenin železa u granulované vysokopecní strusky, které by ale při zohlednění skelné fáze a relativní nepřesnosti použité XRD metody neměli výrazně vybočovat z normálu. Dalším poznatkem je vysoký obsah Al₂O₃ u ocelářské strusky K. Takto vysoký obsah Al₂O₃ je typický pouze po strusky z licích pánví, což by nasvědčovalo tomu, že se může jednat právě o tento typ strusky. Opět připomeňme, že se jedná o hodnoty pouze orientační, zejména u granulované vysokopecní strusky by měla skelná fáze tvořit podstatnou část celého systému. Pro určení přesného chemického složení by bylo vhodné použít dodatečné měřicí metody, například spektrální analýzu. Případně také analyzovat podíl skelné fáze jednou z dostupných metod, kterou je například využití doplňku SIROQUANT pro XRD analýzu a provedení referenčních experimentů.

3.1.3 Cement

Pro výrobu vzorků byl jako základ použit běžný cement CEM I 42,5 R z cementárny Radotín, tedy cement se zvýšenou počáteční pevností bez dalších přísad, které by případně mohly ovlivnit interakci mezi cementem a struskou. Dle specifikací toho cementu podle normy ČSN EN 197-1 by měl splňovat následující parametry:

- Pevnost v tlaku po 2 dnech – min. 20 MPa.
- Pevnost v tlaku po 28 dnech – min 42,5 MPa.
- Obsah SO₃ a ostatních síranů – méně než 4 % hmotnosti.

Studie předpokládá splnění požadavků na složení komerčně prodávaného cementu a jeho vlastnosti a složení v nezpracovaném stavu nebyly experimentálně ověřeny.

3.1.4 Voda

Cement a struska byly smíchány s běžnou kohoutkovou vodou bez dalších přísad. Dle zveřejněných statistik společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s. splňovala tato voda v době betonáže všechny podmínky stanovené vyhláškou č. 252/2004 Sb.

3.2 Zkušební vzorky

Pro zkušební účely byly vyrobeny vzorky standardních rozměrů $40 \times 40 \times 160$ mm. Vzorků bylo vyrobeno celkem 66. Pro každou strusku bylo vyrobeno šest vzorků pro pět různých obsahů strusky a to 10, 20, 30, 40 a 50 %. Dále byla vyrobena jedna sada šesti vzorků s nulovým obsahem strusky, sloužící jako kontrolní skupina.

Jednotlivé vzorky jsou značeny písmenem a číslovkou. Písmeno slouží k odlišení dvou použitých typů strusky (použitá písmena „K“ a „O“). Číslovka udává procento obsahu strusky v daném vzorku. Kontrolní skupina, tedy skupina bez přidané strusky, je značena R0. Z každé sady vzorků byla testována polovina, tedy 3. Druhá polovina je určena na další studie, například dlouhodobé pevnosti.

3.2.1 Výroba vzorků

Vzorky byly vyrobeny v laboratořích katedry mechaniky. Vodní součinitel byl stanoven dle první sady, kterou byla sada K50. Bylo předpokládáno, že vzhledem k vyšší jemnosti mletí strusky by s jejím narůstajícím obsahem měla růst i zpracovatelnost směsi. Předpoklad se ukázal jako správný, potvrzený zkouškou konzistence čerstvé malty s použitím sřásacího stolku dle ČSN EN 1015-3, kde vzorky v vyšším obsahem strusky vykazovaly i vyšší hodnoty rozlití. Vodní součinitel byl stejný pro všechny sady za účelem srovnání vlastností cementu a strusky bez vlivu rozdílného množství vody.

Sada	R0	K 10	K 20	K 30	K 40	K 50	O 10	O 20	O 30	O 40	O 50
Voda [g]	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Cement [g]	2600	2340	2080	1820	1560	1300	2340	2080	1820	1560	1300
Struska [g]	0	260	520	780	1040	1300	260	520	780	1040	1300

Tabulka 3-5 Hmotnostní složení směsí (v gramech)

Pro každou sadu byl proveden následující postup:

1. Navážení příslušného množství cementu a strusky s přesností ± 2 g.
2. Promíchání těchto složek v plastovém kýblu v suchém stavu.
3. Za konstantního míchání postupné přidání celého množství vody.
4. Dodatečné míchání směsi v mokřém stavu po dobu cca 30–60 vteřin.
5. Uložení výsledné směsi do forem.

Po míchání bylo použito elektrické míchadlo MAKI s nástavcem pro maltu. Směs po zamíchání nevykazovala žádné známky hrudek, nečistot nebo nezvlhčených částí cementu či strusky. Vzorky byly zhotoveny v přibližně půlhodinových intervalech v trojformách na trámečky $40,1 \times 40 \times 160$ mm dle ČSN EN 196-1. Formy byly před uložením směsi očištěny, vymazány olejem a jejich délkové rozměry zaznamenány. U forem byl šuplerou změřen podélný rozměr s přesností $\pm 0,01$ mm a to pro každý vzorek zvlášť. Ostatní rozměry nebyly měřeny, bylo předpokládáno, že tyto rozměry relativně splňují uvedené hodnoty a jejich rozměry nejsou kritické pro měření smrštění.

Formy byly poté plněny hotovou maltou běžným způsobem pomocí špachtlí. Po naplnění byly formy setřeseny nakloněním a popuštěním na stůl za účelem odstranění možných vzduchových bublin, které v maltě během ukládání mohly vzniknout. Nakonec byly vzorky zarovnané dle okrajů formy do roviny a uloženy v pokojové teplotě cca 19 °C.

3.2.2 Odformování a uložení vzorků

Vzorky byly odformovány druhý den ve stejném pořadí, v jakém byly zhotoveny. Po vyjmutí z forem byly uloženy do dvou plastových nádob o objemu cca 20L a zality kohoutkovou vodou, tak aby byly všechny vzorky zcela ponořeny. Pro zrání vzorků ve vodě bylo rozhodnuto zejména z důvodu zdůraznění vlastností strusky, která vykazuje lepší vlastnosti při dostatečném přístupu vody pro hydrataci. Zalité vzorky byly poté uloženy do místnosti při pokojové teplotě, přibližně 19–20 °C.

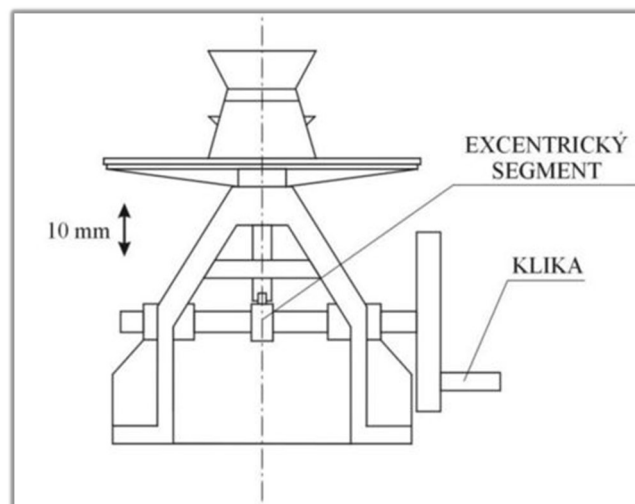
3.3 **Nedestruktivní měření**

V této kapitole bude probrána metodika veškerých nedestruktivních měření provedených na vzorcích a maltě během celého procesu výroby a testování. Jedná se o stanovení konzistence čerstvé malty pomocí střešacího stolku, měření rozměrů, hmotnosti a smrštění a měření vlastních frekvencí a výpočet modulu pružnosti během prvního měsíce zrání vzorků.

3.3.1 Stanovení konzistence čerstvé malty

Zkouška konzistence čerstvé malty s použitím střešacího stolku byla provedena dle ČSN EN 1015-3 (Schéma viz Obrázek 3-5). U zkoušky se stanovuje hodnota rozliti zkušebního vzorku čerstvé malty pomocí kovového kužele po předepsaném počtu svislých pádů. Postup zkoušky byl následující:

1. Očištění a natření minerálním olejem desky o průměru 300 mm a zkušební kužele o průměru 100 mm (spodní) a 70 mm (horní).
2. Umístění kužele do středu desky setřásacího stolku.
3. Přípravení malty.
4. Naplnění kužele ve dvou vrstvách. Každá vrstva se rozprostře min. 10 lehkými údery dusadla o průměru 40 mm. Kužel musí být naplněn rovnoměrně.
5. Setření přebytečné malty pomocí špachtle a otření volné plochy desky do sucha.
6. Sejmutí kužele svislým pohybem po přibližně 15 sekundách.
7. Provedení 10 nárazů setřásacího stolku a zaznamenání dvou na sebe kolmých průměrů rozlitého tělesa.
8. Provedení dalších 10 nárazů setřásacího stolku a zaznamenání finálních dvou hodnot průměrů rozlitého tělesa.



Obrázek 3-5 Schéma setřásacího stolku dle ČSN EN 1015-3

Dvojice hodnot byla zaznamenána v milimetrech, výsledné hodnoty zkoušky jsou průměrem těchto hodnot. Žádný z naměřených údajů se nelišil o více než 10 % od průměrné hodnoty, zkoušku tedy nebylo nutné opakovat.

3.3.2 Měření rozměrů, hmotnosti a smrštění

Měření hmotnosti a rozměrů vzorků bylo prováděno v týdenních intervalech, současně s měřením modulu pružnosti pulzní metodou popsanou v další kapitole. Před každým měřením byly vzorky vyjmuty z vody, osušeny látkou a ponechány na vzduchu po dobu přibližně 180 minut, během kterých byly změřeny a poté byly vráceny zpět do vody.

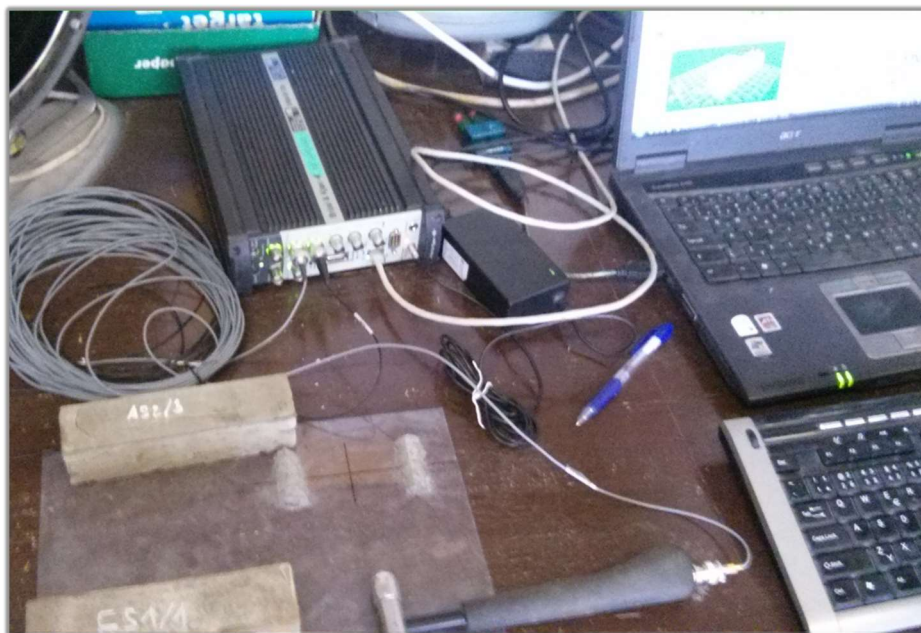
Vážení bylo provedeno běžnou laboratorní váhou s rozlišením $\pm 1\text{g}$. Všechny vzorky byly váženy naráz přibližně 20-30 minut po vyjmutí z vody, aby byl minimalizován vliv vlhkosti na váhu vzorku. Po ukončení měření, tedy přibližně 180 minutách byly namátkou zváženy některé vzorky a jejich hmotnost porovnána s původním měřením. Při žádném z těchto srovnání nebyl rozdíl mezi první a druhou hmotností větší než 1 gram, vliv vlhkosti vzorků lze tedy považovat za zanedbatelný.

Měření rozměrů bylo provedeno digitálním posuvným měřítkem s přesností $\pm 0,01\text{ mm}$. U každého vzorku byl každý rozměr měřen ve dvou rovnoběžných směrech na opačných stranách vzorku a jejich hodnota zprůměrována. Přesto se u měření objevili nepřesnosti způsobené nepravidelností povrchu vzorků.

3.3.3 Měření dynamického modulu pružnosti metodou pulzního buzení

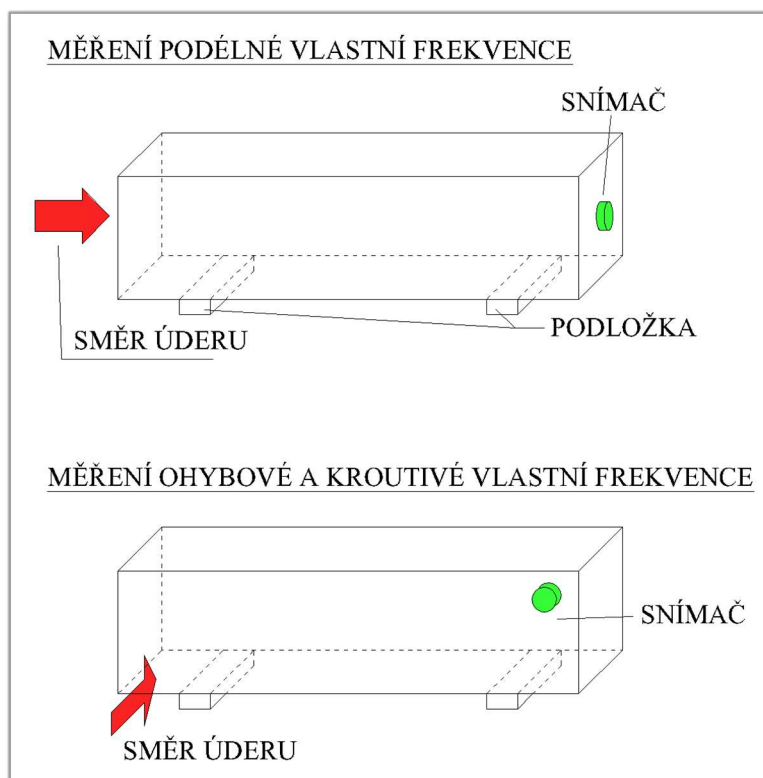
Metoda je založena na určeních vlastních frekvencí vzorku pomocí dynamického buzení a následném výpočtu dynamických Youngův modulů pružnosti z těchto vlastních frekvencí a rozměrů příslušného vzorku. Touto metodou lze měřit i vlastní frekvence v ohybu a kroucení, čehož lze využít pro získání další hodnoty modulu pružnosti a tedy kontroly naměřených hodnot.

Pro měření byla použita sestava Brüel & Kjaer (Obrázek 3-6), skládající se z měřicí stanice typu 3560-B-120 sloužící pro záznam buzení a odezvy, převodníků zrychlení (snímače) typu 4519-003, budící kladívko 8206 a počítač. Snímače byly na vzorky upevňovány pomocí vosku. Pro zpracování výstupních dat měření byl použit software PULSE LabShop v14.0.1, který naměřené akustické odezvy převádí z časových na frekvenční pomocí rychlé Fourierovy transformace.



Obrázek 3-6 Sestava měřicí stanice

Na každém vzorku bylo provedeno měření ve dvou různých směrech, podélném a příčném, Buzení v příčném směru vyvolává ohybovou a kroučivou rezonanci zároveň. Pro tato měření byly použity následující konfigurace snímače a směru buzení (Obrázek 3-7).

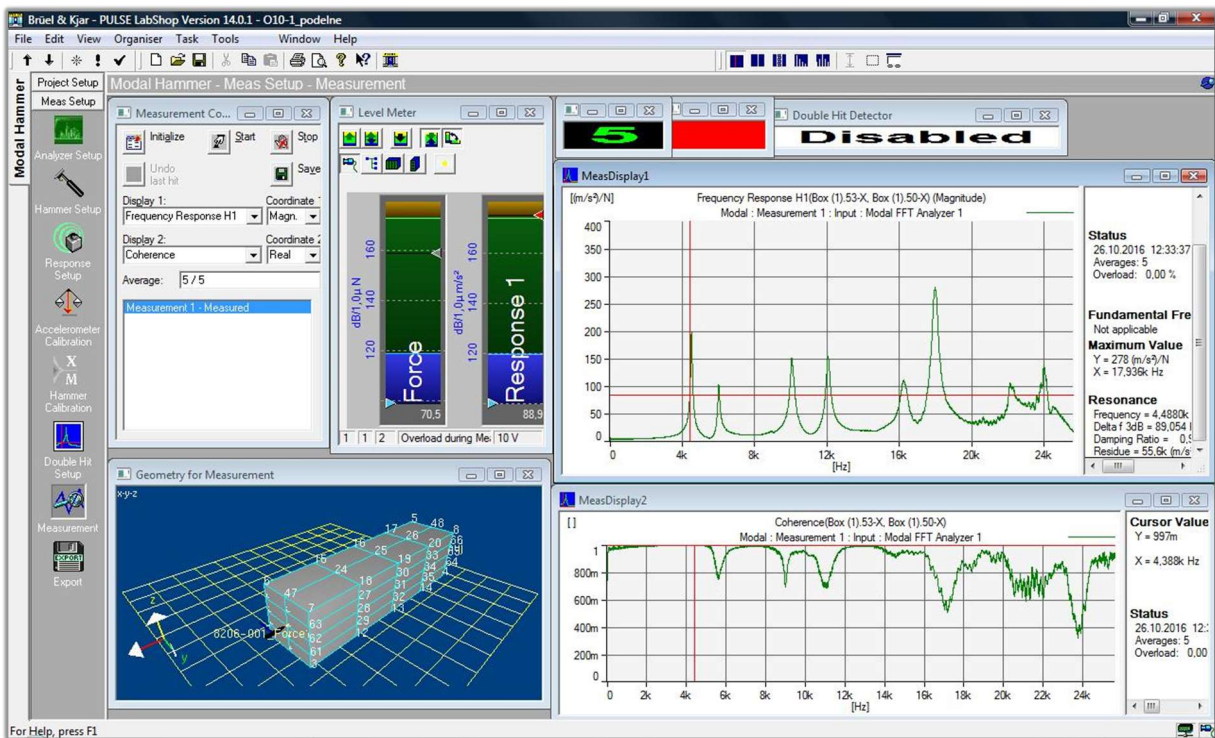


Obrázek 3-7 Schéma konfigurace měřících zařízení na vzorku

Postup měření byl pro každý vzorek následující:

1. Uložení měřeného vzorku na izolační podložku tak, aby se žádná jeho část nedotýkala stolu, pouze podložky.
2. Umístění snímače na střed 40×40 mm stěny vzorku.
3. Spuštění záznamu měření v softwaru.
4. Provedení pěti úderů na opačnou stranu vzorku měřícím kladívkem.
5. Zaznamenání první a druhé podélné vlastní frekvence vzorku.
6. Umístění snímače do horního rohu vzorku na boční hraně.
7. Provedení pěti úderů do dolního rohu na opačné straně boční hrany vzorku.
8. Zaznamenání první a druhé ohybové a kroutové vlastní frekvence vzorku.

Výstupem softwaru je zde funkce frekvenční odezvy (Obrázek 3-8), kde vrcholky představují právě vlastní frekvence. V případě měření podélné vlastní frekvence reprezentuje každý vrcholek jednu z frekvencí. V případě měření ohybové a kroutové vlastní frekvence jsou pro tyto vzorky ohybové frekvence na lichých pozicích a kroutové frekvence na pozicích sudých. Při správně provedeném měření jsou vrcholky v grafu jasně definovány. Pokud se u jedné frekvence nachází více lokálních maxim, je třeba měření opakovat.



Obrázek 3-8 Výstup měření z programu PULSE Labshop

Výsledky měření touto metodou jsou relativně přesné s minimálními odchylkami mezi jednotlivými vzorky ze stejné sady (obvykle v rozmezí $\pm 2\%$). Výslednými hodnotami jsou zde modul pružnosti, smykový modul pružnosti a Poissonovo číslo. Popis výpočtu těchto hodnot z vlastní frekvence a rozměrů bude rozebrán v následující kapitole.

3.3.4 Výpočet modulů pružnosti z dat získaných metodou pulzního buzení

Přímým výstupem této metody jsou vlastní frekvence jednotlivých vzorků. Abychom z nich získali moduly pružnosti, je nutno provést sérii výpočtů.

Z podélné vlastní frekvence lze modul pružnosti vypočítat jako [Topič et al., 2015]:

$$E_{d,l} = Dmf_1^2 \quad (3-I)$$

kde:

$E_{d,l}$ = podélný dynamický modul pružnosti [Pa]

m = hmotnost vzorku [kg]

f_1 = podélná vlastní frekvence vzorku [Hz]

D – získáme ze vztahu:

$$D = 4L/tb \quad (3-II)$$

kde:

L = délka vzorku [m]

t = výška vzorku [m]

b = šířka vzorku [m]

Alternativou je výpočet příčného modulu pružnosti pomocí ohybových vlastních frekvencí, který může sloužit jako kontrola vypočtených hodnot a ukazatel přesnosti provedených měření. Obvykle se tyto dva moduly liší o méně než 2%. Následující vzorce jsou převzaty ze standardu ASTM 1876-01 (2006). Pro výpočet příčného dynamického modulu pružnosti obecně platí vzorec 3-III.

$$E_{d,p} = \frac{0.9462mL^3 f_p^2 T_1}{bt^3} \quad (3-III)$$

kde:

$E_{d,p}$ = příčný dynamický modul pružnosti [Pa]

m = hmotnost vzorku [kg]

L = délka vzorku [m]

f_p = vlastní ohybová frekvence [Hz]

T_1 = korekční součinitel

b = šířka vzorku [m]

t = výška vzorku [m]

Korekční součinitel zohledňuje konečnou tloušťku vzorku a Poissonovo číslo materiálu. V případě, že má měřené těleso poměr $L/t > 20$, lze tento součinitel zjednodušit, obecně ho však lze vypočítat dle následujícího vzorce:

$$T_1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752 \mu + 0,8109 \mu^2)(t/L)^2 - 0,868 (t/L)^4 \quad (3-IV)$$

$$- \left[\frac{8,340 (1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2(t/L)^4)}{1,000 + 6,338(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2(t/L)^4)} \right]$$

Kde μ je Poissonovo číslo [-], t je tloušťka vzorku [m] a L je délka vzorku [m].

Pokud Poissonovo číslo není známo, je potřeba začít odhadnutou hodnotou a použít ji jako základ iteračního výpočtu. Smykový modul pružnosti G_d , získáme z kroutivé vlastní frekvence vzorku dle vzorce:

$$G_d = \frac{4 L m f_t^2}{bt} \frac{B}{1+A} \quad (3-V)$$

kde:

G_d = smykový dynamický modul pružnosti [Pa]

m = hmotnost vzorku [kg]

L = délka vzorku [m]

f_t = vlastní kroutivá frekvence [Hz]

b = šířka vzorku [m]

t = výška vzorku [m]

A je zde korekční faktor, který má na výsledek rovnice vliv menší než 2 % [ASTM 1876–01, 2006]. Pokud není taková přesnost požadována, lze ho z výpočtu vynechat a použít pouze korekční faktor B , který lze vypočítat dle vzorce:

$$B = \left[\frac{b/t+t/b}{4(t/b)-2,52(t/b)^2+0,21(t/b)^6} \right] \quad (3-VI)$$

kde:

t = je tloušťka vzorku [m]

L = je délka vzorku [m]

Po vypočtení smykového modulu pružnosti dle vzorce 3-V lze Poissonovo číslo vypočítat ze vztahu:

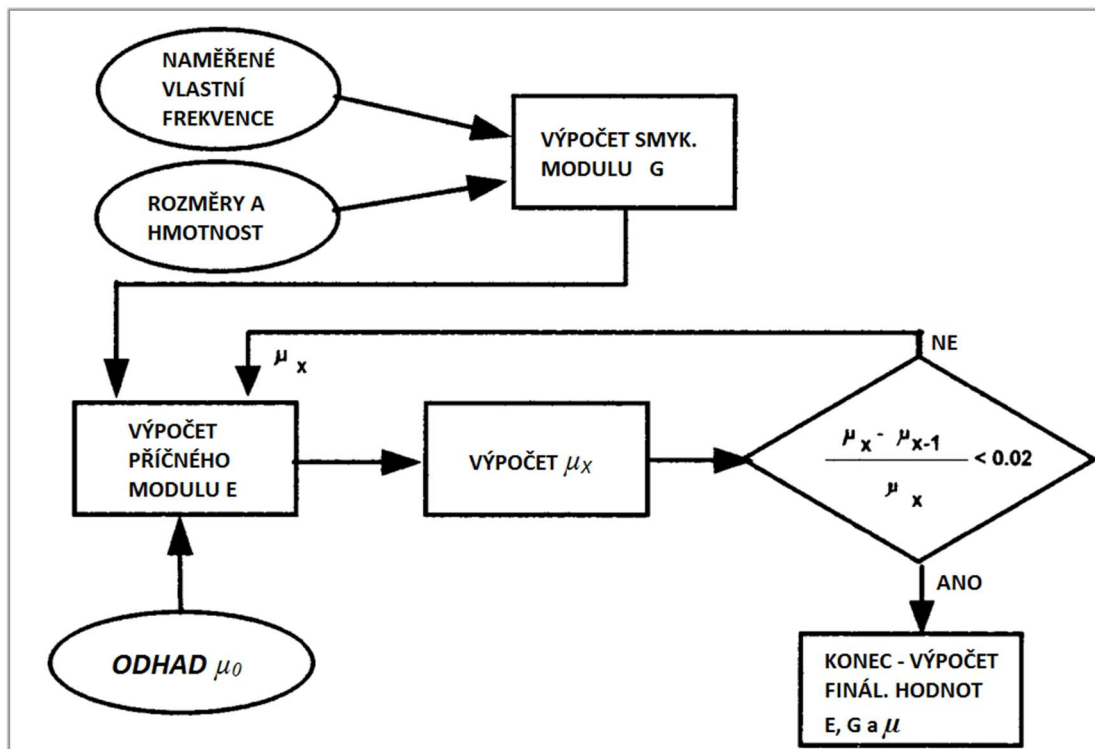
$$\mu = E_d/2G_d - 1 \quad (3-VII)$$

Kde:

G_d = smykový dynamický modul pružnosti [Pa]

E_d = příčný dynamický modul pružnosti [Pa]

Vypočtené Poissonovo číslo použijeme zpětně do vzorce pro výpočet korekčního faktoru T_1 (3-IV) a získáme tak další iteraci výpočtu. Výpočet je opakován, dokud nedosáhneme požadované přesnosti μ . Celý proces výpočtu lze shrnout vývojovým diagramem (Obrázek 3-9). Vypočtená hodnota příčného modulu pružnosti $E_{d,p}$ je použita pro kontrolu vypočteného podélného modulu pružnosti $E_{d,l}$. Průměrný rozdíl těchto dvou modulů ze všech měření činil 2,6 % se směrodatnou odchylkou 1,7 %. Rozdíly zde byly způsobeny pravděpodobně mírnou nepravidelností výšky prvků, proto jsou v jako průkazné prezentovány pouze moduly podélné, které by tímto faktorem neměly být ovlivněny.



Obrázek 3-9 Vývojový diagram výpočtu modulů pružnosti iteračním způsobem [ATSM, 2006]

3.3.5 Měření modulu pružnosti ultrazvukovou metodou

Metoda byla použita jako dodatečný test pro srovnání s dynamickými moduly pružnosti získanými z metody pulzního buzení. Měření bylo provedeno v den destruktivních zkoušek, tedy při stáří vzorku 28 dní. Principem metody je změření rychlosti šíření ultrazvukových vln v materiálu, které je přímo závislé na Youngově modulu pružnosti a objemové hmotnosti. Ve vzorci je také použita korekce vycházející z Poissonova čísla, které bylo určeno v rámci metody pulzního buzení. Dynamický modul $E_{d,u}$ byl spočten dle následujícího vzorce [Prassianakis N.I., 2004]:

$$E_{d,u} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \rho v^2 \quad (3-VIII)$$

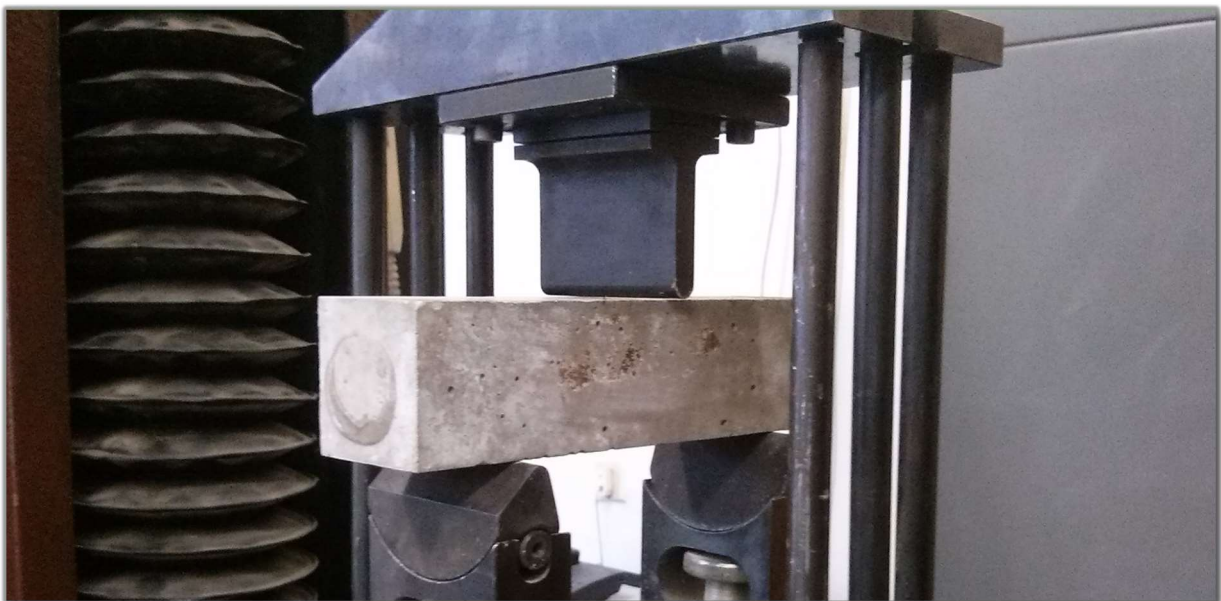
Kde μ je Poissonovo číslo, ρ je objemová hmotnost materiálu a v je rychlost šíření vlny naměřená přístrojem. Pro Poissonovo číslo byl ve vzorci použit průměr hodnot vzorků ze stejné sady.

3.4 Destruktivní měření

Destruktivní zkoušky byly provedeny v laboratořích Fakulty Stavební ČVUT v Praze po 28 dnech od vyrobení vzorků. Provedena zde byla zkouška pevnosti v tahu trojbodovým ohybem a zkouška pevnosti v tlaku. Tlaková zkouška byla provedena orientačně na zlomených trámčích po provedení ohybové zkoušky. Zkušební tělesa nebyla před touto zkouškou dodatečně upravována.

3.4.1 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Zkouška byla provedena na hydraulickém lisu o max. síle 100 kN. Průběh průhybu a zatížení byl zaznamenáván softwarem. Každý vzorek byl zatěžován konstantní rychlostí 0,1 mm/s až do jeho úplného porušení. Rozteč podpor byla 100 mm. Uložení vzorku viz Obrázek 3-10.

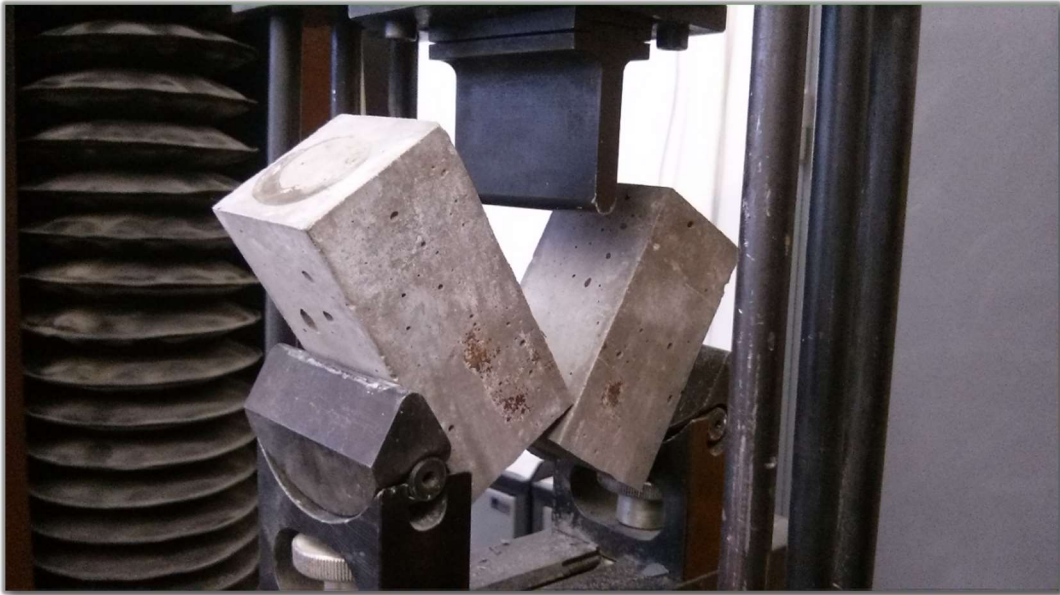


Obrázek 3-10 Fotografie - Uložení zkušebního vzorku do lisu

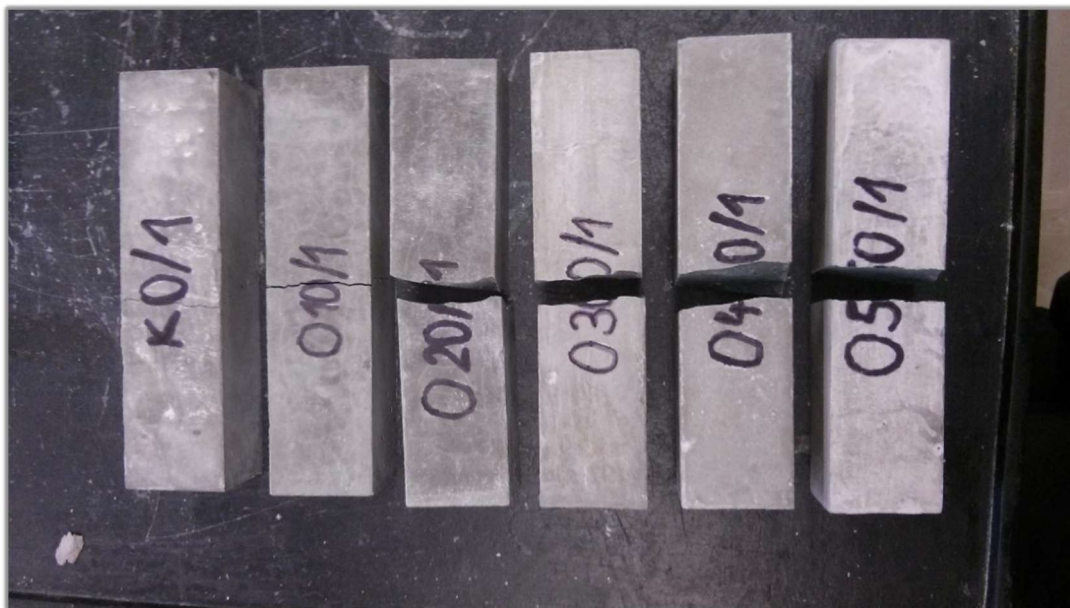
U všech vzorků došlo u zkoušky ke křehkému lomu uprostřed rozpětí podpor (Obr. 3-11 a 3-12). Pevnost v tahu ohybem byla spočtena dle ČSN EN 12390-5 dle vzorce:

$$f_{cf} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3-IX)$$

Ve kterém F je maximální zatěžovací síla, l je vzdálenost mezi podporami a b , h jsou rozměry prvku.



Obrázek 3-11 Fotografie – ukončení ohybové zkoušky



Obrázek 3-12 Fotografie - porušení vzorků

3.4.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Zkouška byla provedena na pěti polovinách vzorků z každé sady, které zbyly po ohybové zkoušce. Jedna polovina byla uschována pro případné studium vnitřní struktury. Použit byl lis o max. síle 1000 kN, který má nižší rozlišení než lis použitý u ohybové zkoušky, pevnost

většiny vzorků však neumožnila porušení silou nižší než 100 kN. Také rychlost zatěžování byla pouze přibližná a to 1 kN/s. Zmíněné parametry ovlivnily přesnost provedených měření. Kontaktní plocha byla z obou stran vzorku 40×40 mm. Průběh zkoušky byl i zde zaznamenáván softwarem. Výsledkem měření jsou průběhy deformace a síly v čase. Všechny vzorky se porušily vyhovujícím způsobem. Pevnost v tlaku byla stanovena dle ČSN EN 12390-3 vztahem:

$$f_c = F/A_c \quad (3-X)$$

Kde F je maximální dosažená síla a A_c je kontaktní plocha, v tomto případě 160 mm^2 .



Obrázek 3-14 Fotografie - Vzorek připravený na zkoušku tlakové pevnosti



Obrázek 3-13 Fotografie - Vzorek po ukončení zkoušky tlakové pevnosti

4 Výsledky experimentů

V této kapitole budou prezentovány a popsány výsledky všech provedených zkoušek. Většina prezentovaných hodnot je získána aritmetickým průměrem naměřených hodnot, pokud není řečeno jinak. U průměrných výsledků je přiložena i směrodatná odchylka provedených měření.

4.1 Nedestruktivní zkoušky

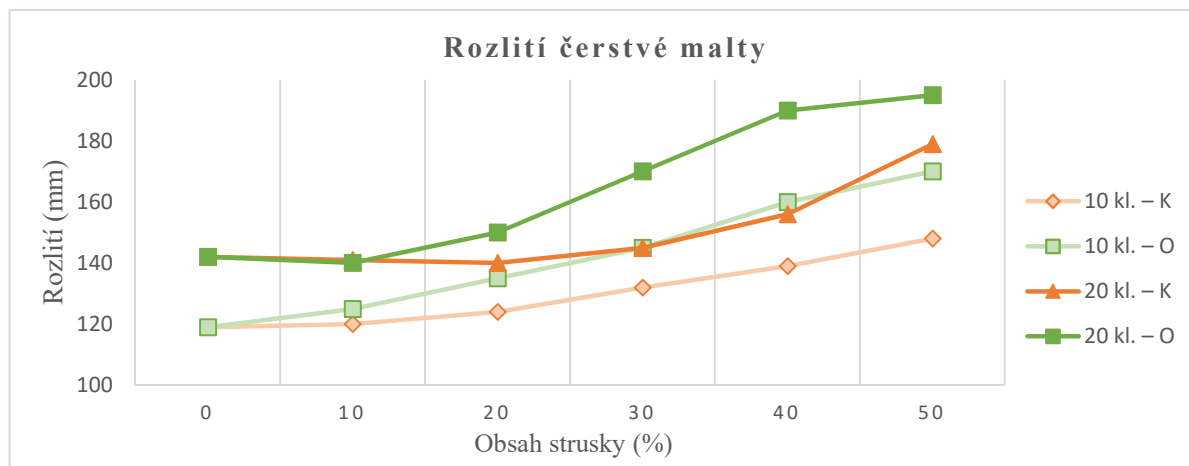
4.1.1 Zkouška konzistence čerstvé malty

Jak již bylo zmíněno, všechny vzorky měly stejný vodní součinitel. Vliv přidané strusky na konzistenci malty je tedy patrný. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce.

	Cem.	Struska K					Struska O				
Vzorek	R0	K10	K20	K30	K40	K50	O10	O20	O30	O40	O50
Po 10 klep.	119	120	124	132	139	148	125	135	145	160	170
Po 20 klep.	142	141	140	145	156	179	140	150	170	190	195

Tabulka 4-1 Tabulka naměřených rozlití malt s různou konzistencí (hodnoty v mm)

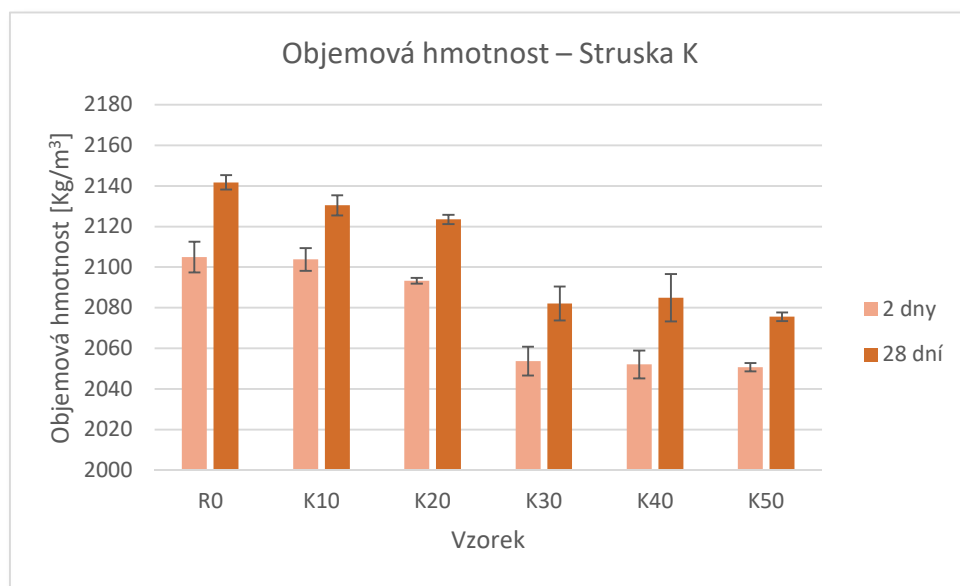
Z grafu (Obrázek 4-1) je zřetelně patrné, že se stoupajícím obsahem strusky tekutost malty stoupá. Dále je zde vidět, že tento jev je důraznější u strusky O, než u strusky K. Příčina je zde pravděpodobně mechanická, tedy vyšší jemnost částic u strusky O.



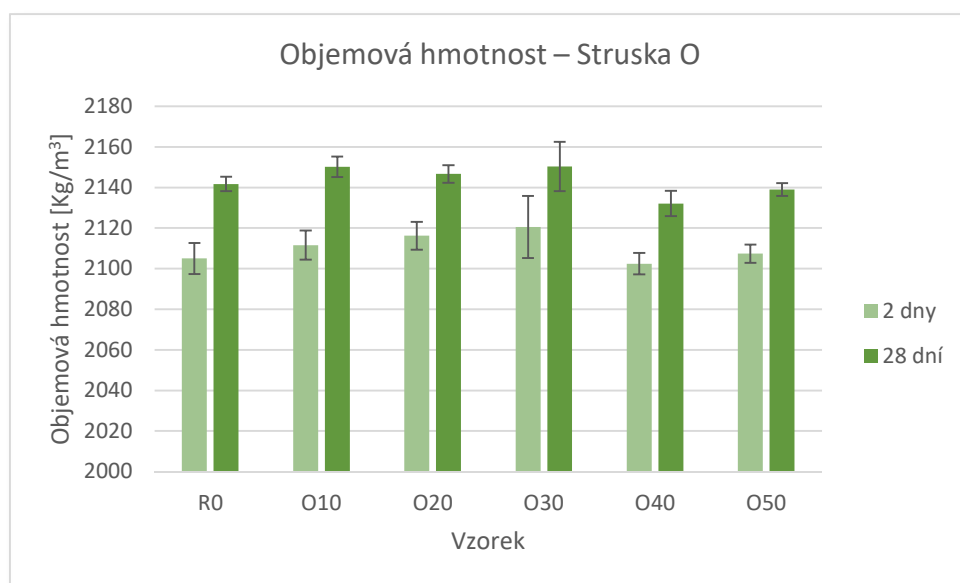
Obrázek 4-1 Graf – Rozlití čerstvé malty v závislosti na obsahu strusky po 10 a 20 sklepnutích.

4.1.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla vypočtena z hmotností vzorků a jejich rozměrů. Prezentovány zde budou hodnoty vypočtené z prvního a posledního měření hmotností a rozměrů (obr. 4-2 a 4-3). Nejvýznamnější rozdíly u hmotnosti nastaly mezi prvním (2 dny) a druhým (9 dní) měřením tedy během prvního týdne od uložení vzorků do vody. Tento nárůst činil průměrně 6 g, tedy $\div 1$ %. Poté byla hmotnost vzorků konstantní v rámci přesnosti měření (± 1 g). Nárůst objemové hmotnosti byl tedy dále ovlivněn pouze smrštěním.



Obrázek 4-2 Graf – Objemová hmotnost vzorků (R0; K10–K50)

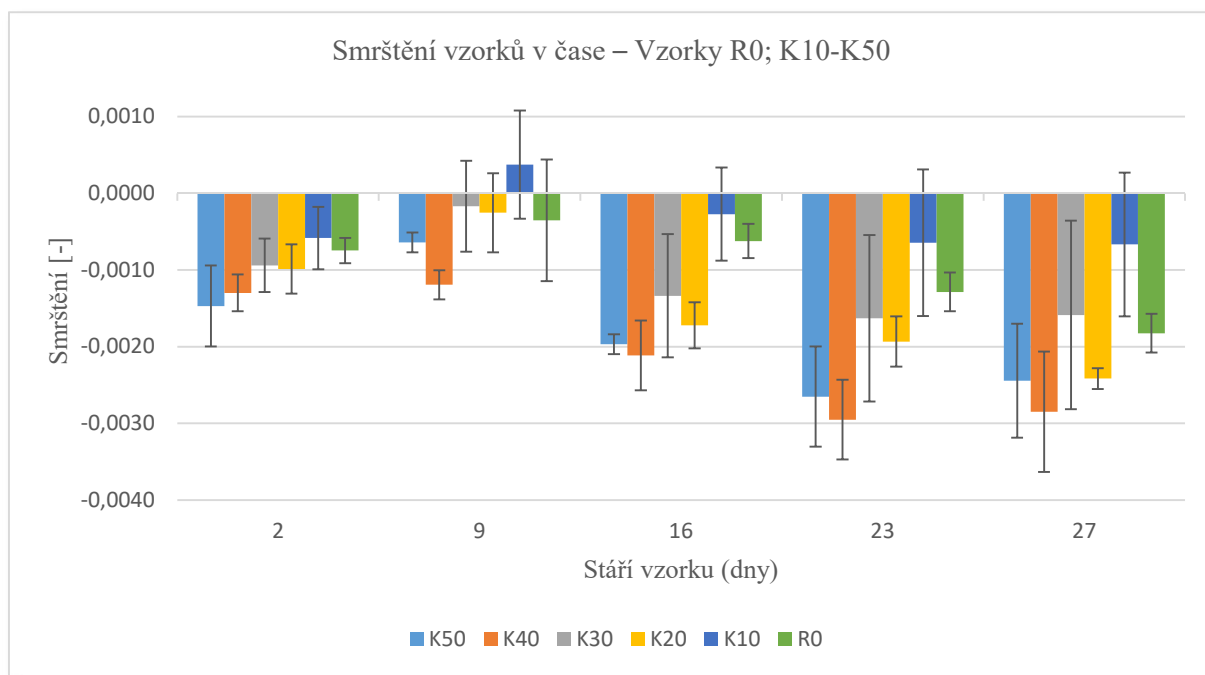


Obrázek 4-3 Graf – Objemová hmotnost vzorků (R0; O10–O50)

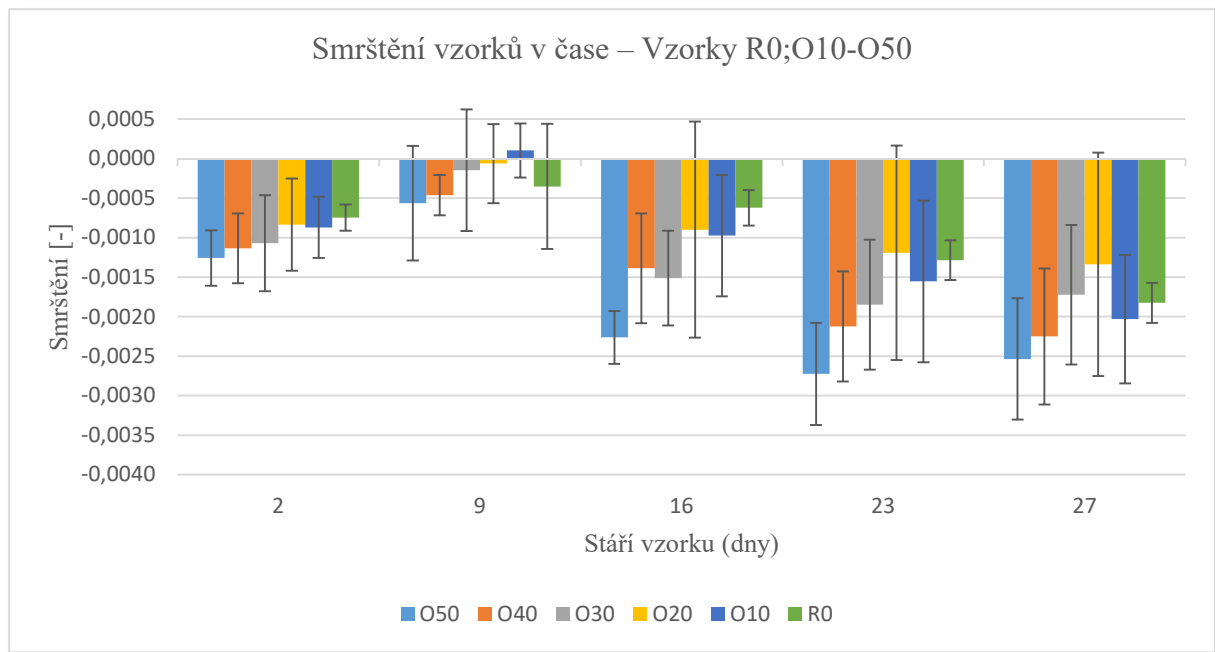
Z grafů je patrný pokles objemové hmotnosti u vzorků obsahující strusku K, u vzorků K50 je tento pokles 2,8 %. U všech vzorků obsahující strusku K je objemová hmotnost nižší než u referenční sady R0. U strusky O tento pokles nenastává, u všech vzorků je objemová hmotnost přibližně stejná jako u referenční skupiny ($\pm 0,4\%$), přičemž u vzorků O10, O20 a O30 nepatrně narůstá, zatímco u vzorků O40 a O50 nepatrně klesá, rozdíly jsou však v rámci jedné směrodatné odchylky.

4.1.3 Smrštění

Výsledky měření smrštění poukazují na to, že podíl strusky na smrštění vliv má. Hodnoty v grafech (Obr. 4-4 a 4-5) vyjadřují poměr mezi naměřenou délkou daného měření a délkou původní formy (mínus jedna). Kladné hodnoty tedy představují natažení oproti původní délce, záporné hodnoty pak smrštění. V grafech jsou znázorněny chybové úsečky velikosti \pm jedné směrodatné odchylky měření.



Obrázek 4-4 Graf - Poměrné smrštění v čase – Vzorky R0; K10-K50



Obrázek 4-5 Graf - Poměrné smrštění v čase – Vzorky R0; O10-O50

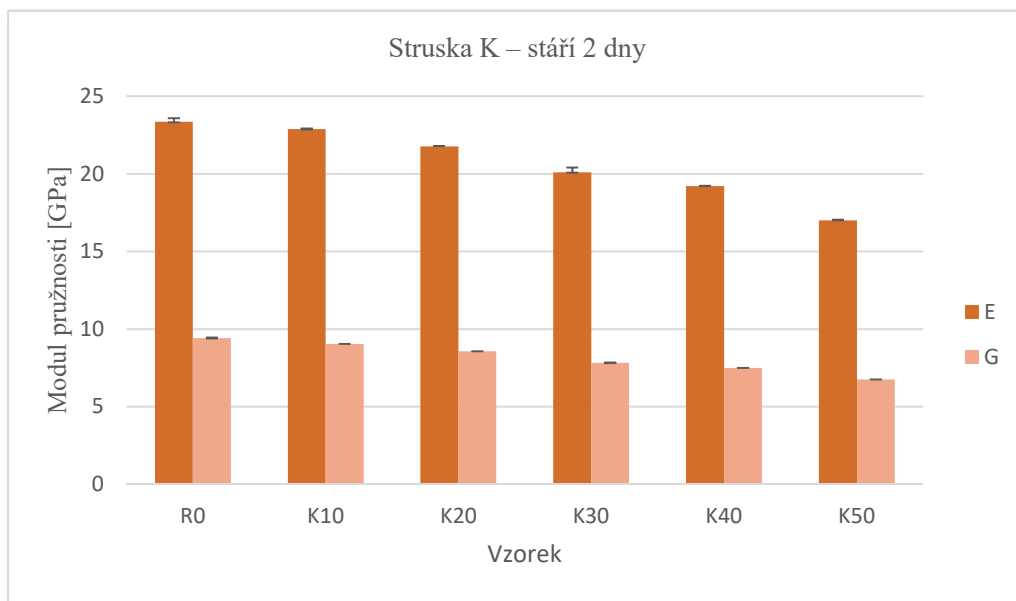
Z hodnot naměřených délek je patrna jistá závislost mezi obsahem strusky a smrštěním, zejména u rozdílu mezi vyndáním z formy a prvním měřením (druhý den od výroby vzorků). Zajímavým poznatkem je expanze vzorků v prvním týdnu po uložení do vody. V kapitole 4.2 bude tento fakt ještě probrán.

Problematickou zde byla nepřesnost provedených měření. Pro tyto vzorky posuvné měřítko pravděpodobně není dostatečně přesným měřicím nástrojem a rozptyl výsledků je příliš velký na to, aby z nich bylo možné dělat definitivní závěry. Fakt, že vzorky byly uskladněny ve vodě, (což minimalizuje smrštění od vysychání) tyto už tak malé délkové rozdíly ještě zmenšil. Pro přesnější výsledky by bylo vhodné použít větší vzorky nebo přesnější metody měření.

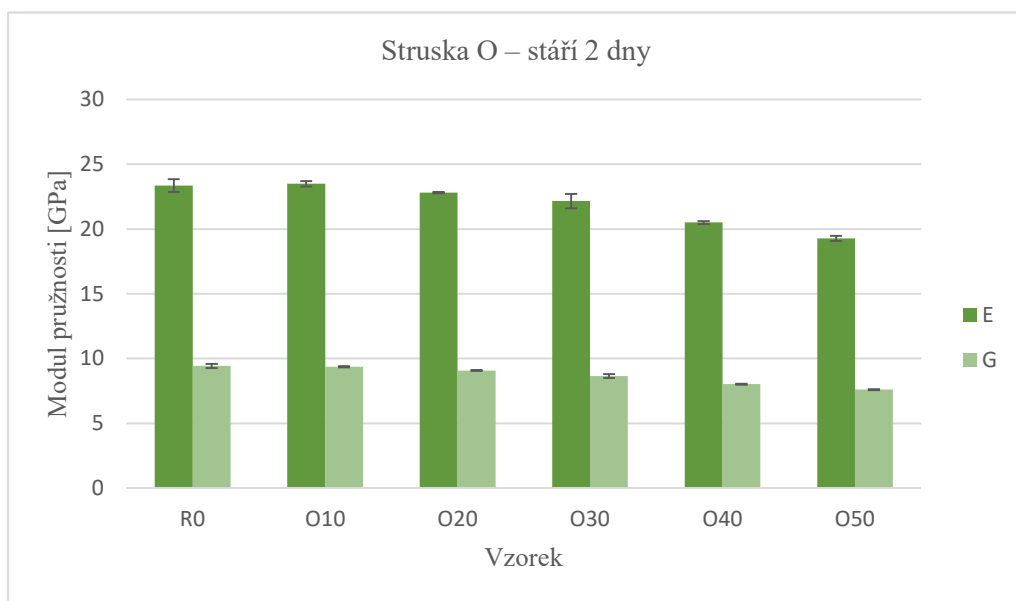
4.1.4 Zkouška impulzním buzením – podélný a smykový modul pružnosti

Prezentované moduly pružnosti jsou vypočteny z podélných vlastních frekvencí dle vzorce 3-I a smykové moduly pružnosti dle vzorce 3-V. Výsledky této zkoušky jsou relativně průkazné. Obsah strusky jednoznačně ovlivňuje Youngův modul pružnosti výsledného betonu. Přestože modul pružnosti nemusí zcela korelovat s pevností, v případě relativně homogenního materiálu je korelace dostatečná na to, aby průběhy obou veličin byly srovnatelné. Vliv je navíc značně odlišný pro oba typy strusky. V následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty získané zprůměrováním jedné sady tří vzorků. Nejprve budou probrány výsledky jednotlivých měření, poté shrnutí celého průběhu.

Výsledky měření – Staří 2 dny (Obr. 4-6 a 4-7)



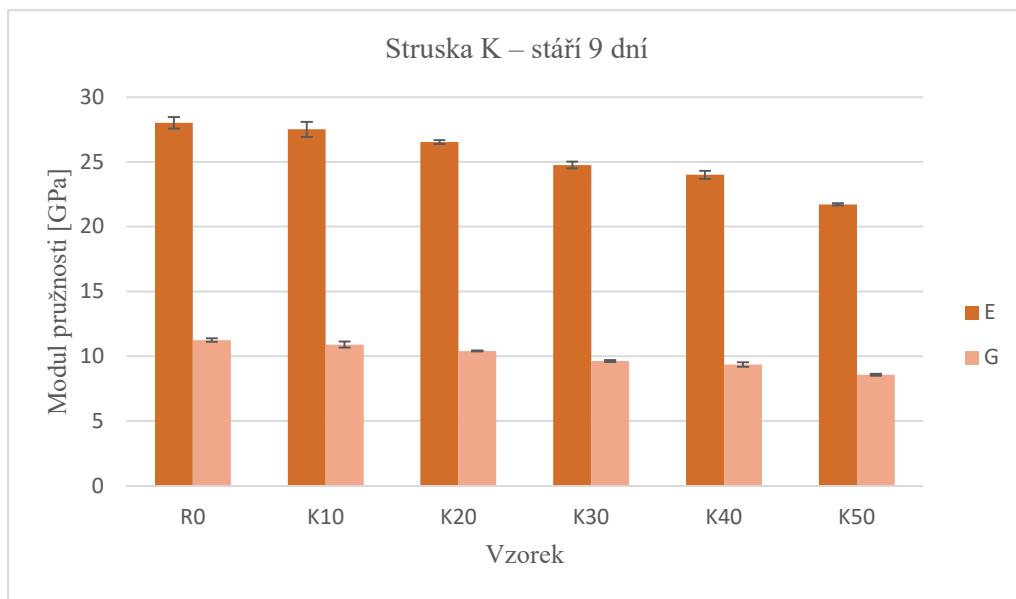
Obrázek 4-6 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; K10-K50; Stáří 2 dny)



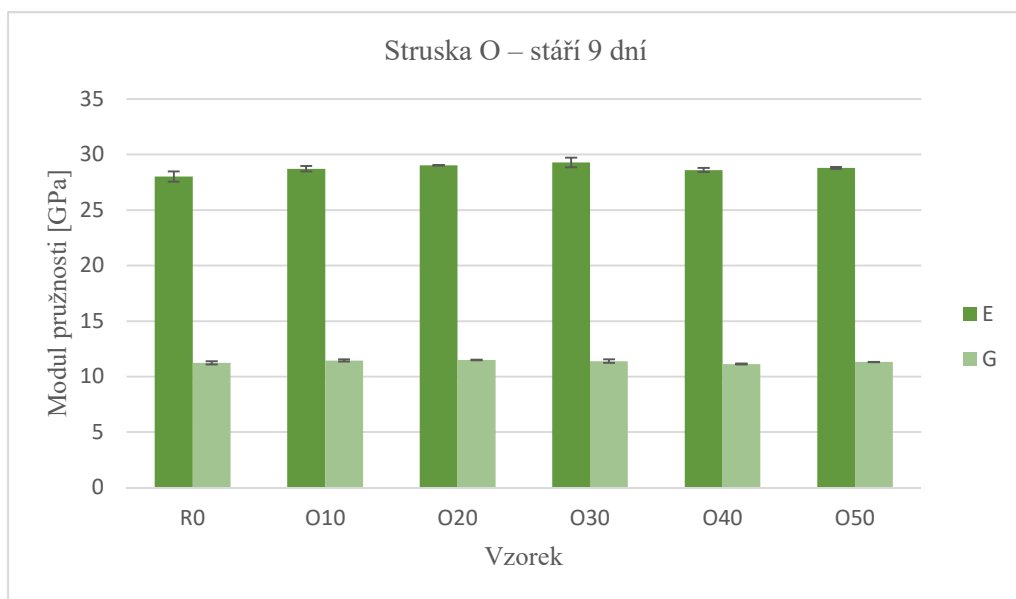
Obrázek 4-7 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; O10-O50; Stáří 2 dny)

Z naměřených hodnot je vidět, že s obsahem strusky modul pružnosti u obou strusek klesá, u strusky K je tento pokles větší, než je tomu u strusky O. Rozdíl mezi modulem pružnosti vzorků R0 a K50 činil 27,2 %, zatímco mezi vzorky R0 a O50 17,5 %. U smykového modulu pružnosti byl rozdíl obdobný. Směrodatné odchylky (zobrazené chybovými úsečkami) jsou zde minimální.

Výsledky měření – Stáří 9 dní (Obr. 4-8 a 4-9)



Obrázek 4-8 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; K10-K50; Stáří 9 dní)

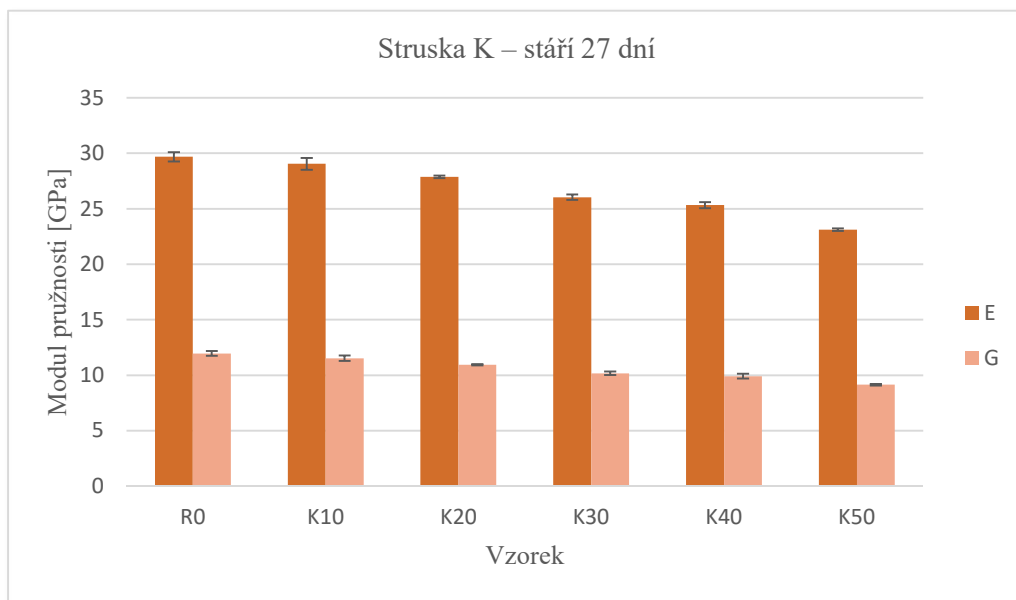


Obrázek 4-9 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; O10-O50; Stáří 9 dní)

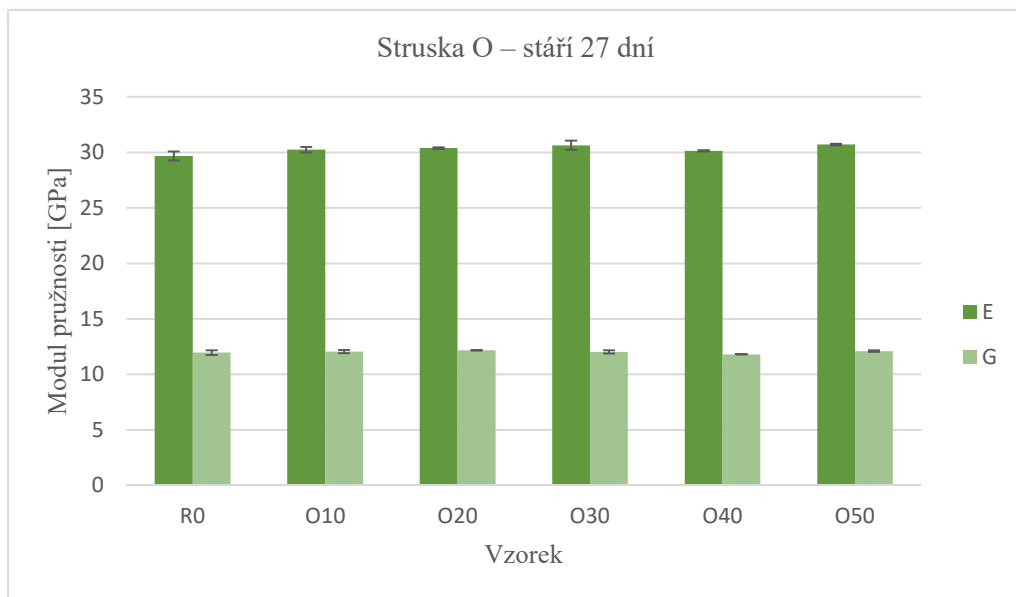
Struska K nijak výrazně své chování nemění, rozdíl mezi R0 a K50 se snížil na 22,5 %. U strusky O však byly naměřené hodnoty nejvyšší u vzorků O20 a O30 a to o 5 %. Všechny vzorky s obsahem této strusky vykazovaly vyšší modul pružnosti, než kontrolní skupina z cementu.

U následujících třech měření nedošlo k výrazným změnám, pouze mírnému pozvolnému navýšení hodnot. Následující hodnoty jsou tedy z posledního měření před destruktivními zkouškami.

Výsledky měření – Stáří 27 dní (Obr. 4-10 a 4-11)

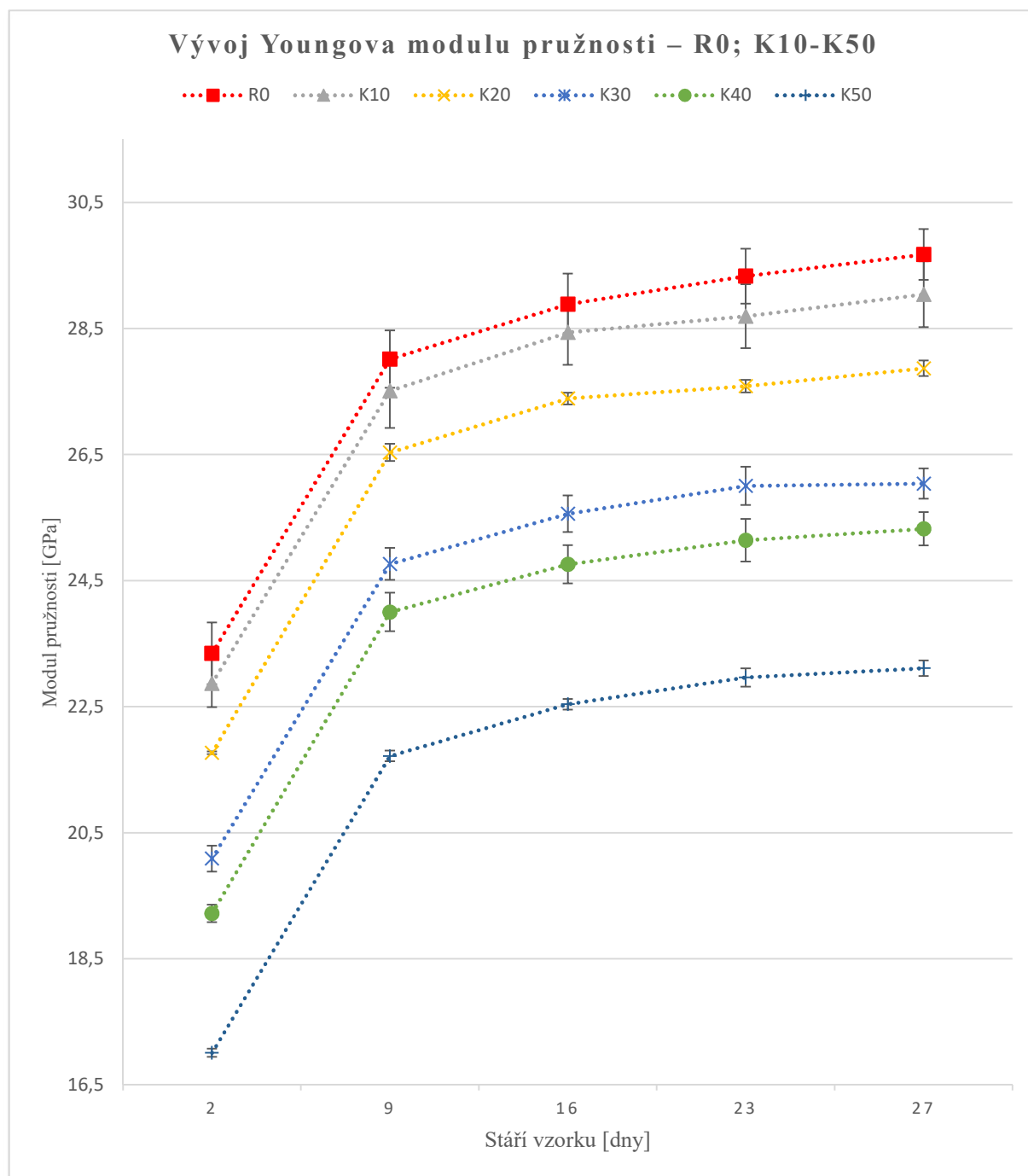


Obrázek 4-10 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; K10-K50; Stáří 27 dní)

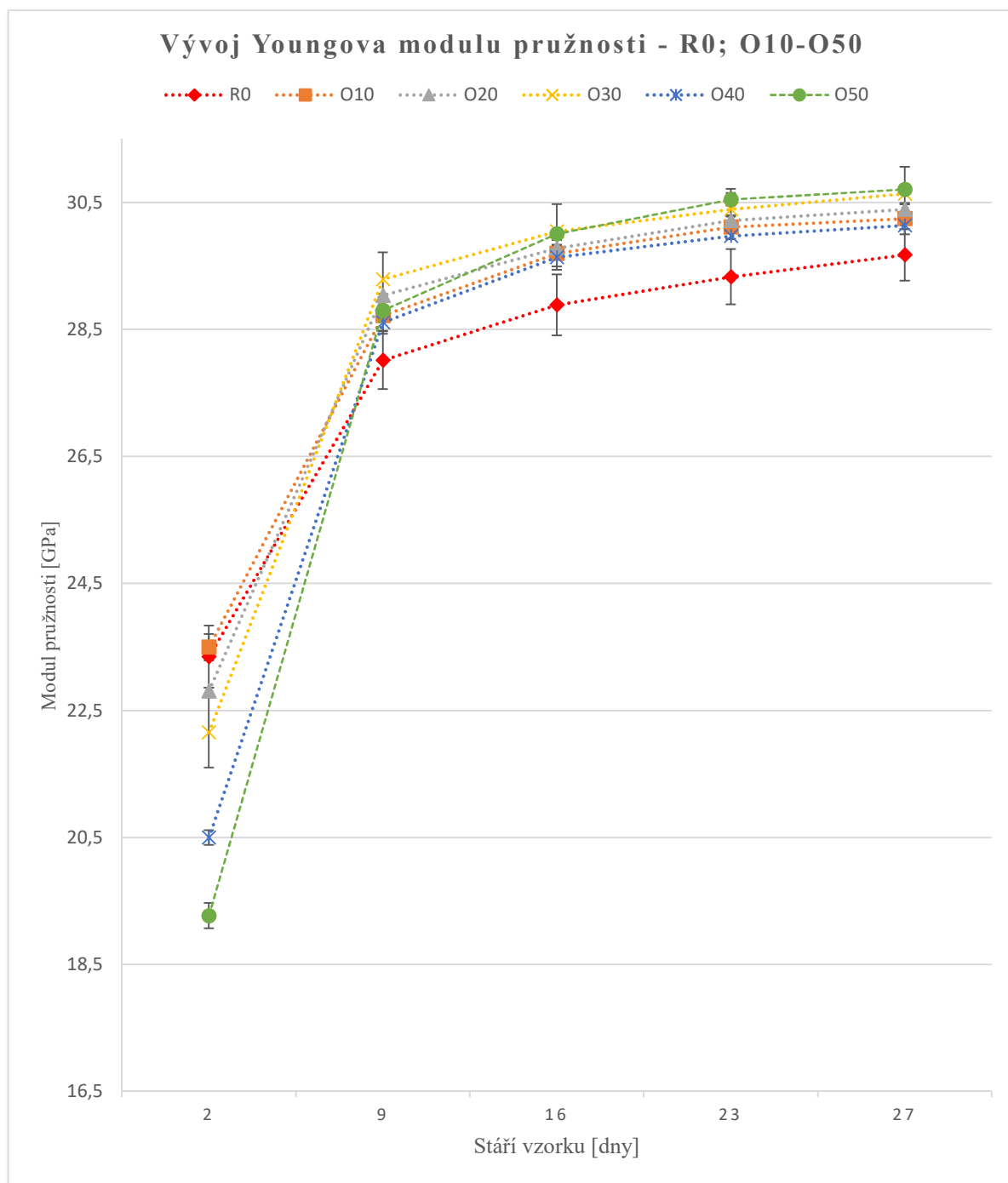


Obrázek 4-11 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; O10-O50; Stáří 27 dní)

I na konci měření vzorky K10-50 vykazovaly chování, které bylo zřetelné na začátku. I nadále zde platí, že zvyšující se obsah strusky snižuje modul pružnosti a to relativně lineárně. U vzorku O10-50 však obsah strusky vede k vyšším hodnotám u všech vzorků, zejména u obsahu strusky 20, 30 a 50 %. V následujících dvou grafech (Obr. 4-12 a 4-13) bude zobrazen vývoj Youngova modulu pružnosti v čase u všech vzorků a měření (z podélných vl. frekvencí).



Obrázek 4-12 Graf - Vývoj Youngova modulu pružnosti (R0; K10–K50)



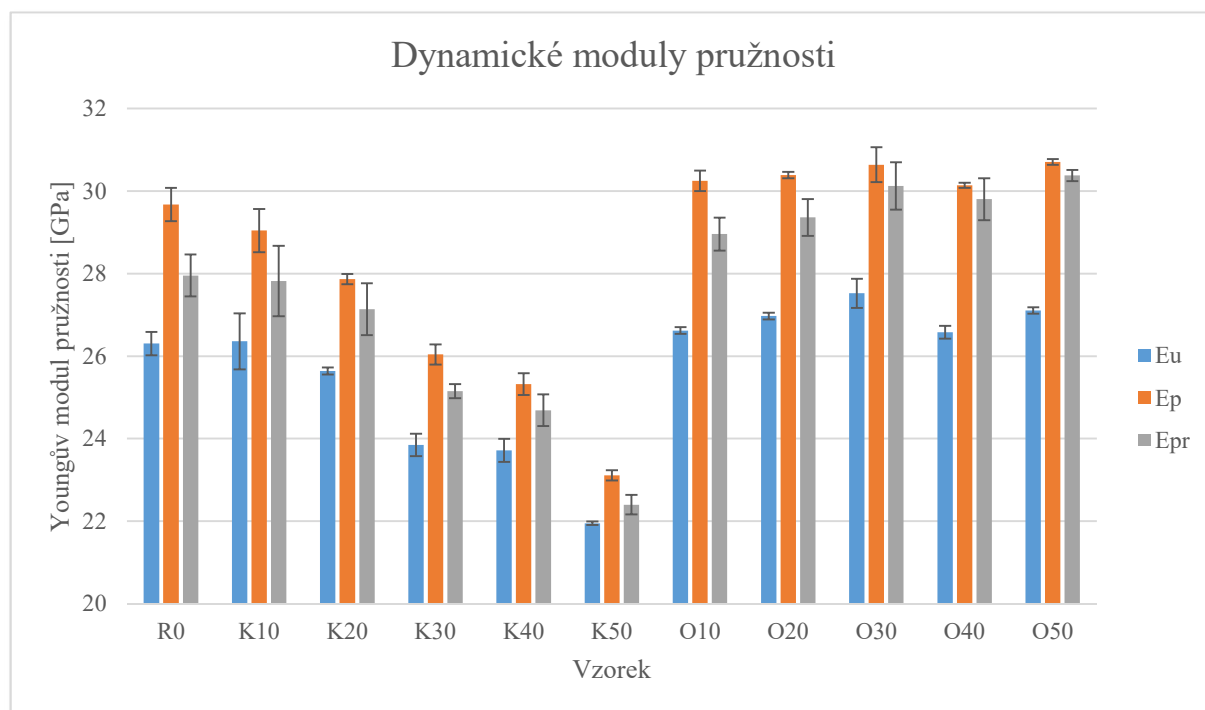
Obrázek 4-13 Graf - Vývoj Youngova modulu pružnosti (R0; O10–O50)

Naměřené hodnoty jednoznačně poukazují na závislost mezi obsahem strusky a modulem pružnosti betonu, pravděpodobně tedy i tlakové pevnosti. Směrodatné odchylky byly spočteny v programu Excel funkcí STDEVA, tedy pro vzorek populace.

Použitá metoda měření produkovala relativně spolehlivé výsledky, přičemž nejvyšší odchylky mezi vzorky ze stejné sady dosahovaly hodnoty 0,59 GPa ($\pm 2\%$), průměrná hodnota odchylky zde byla 0,24 MPa ($\pm 1\%$).

4.1.5 Srovnání hodnot modulu pružnosti z různých metod měření

Youngův modul pružnosti byl v rámci studie vypočten třemi způsoby. Metodou pulzního buzení z vlastních frekvencí podélného kmitání a z vlastních frekvencí příčného kmitání. Dále byla provedena zkouška rychlosti šíření ultrazvukových vln v materiálu. Způsoby výpočtu modulu pružnosti z těchto hodnot jsou popsány v kapitolách 3.3.4 a 3.3.5. Následující data jsou hodnoty z posledních provedených měření, tj. stáří 27 dní pro pulzní metodu a 28 dní pro metodu ultrazvukovou. V grafu (Obrázek 4-14) jsou průměrné hodnoty z každé sady a příslušné směrodatné odchylky znázorněny chybovými úsečkami. Značení: E_u – modul z měření ultrazvukem, E_p – modul vypočten z vlastní frekvence podélného kmitání, E_{pr} – modul vypočten z vlastní frekvence příčného kmitání.



Obrázek 4-14 Graf – Srovnání modulů pružnosti získaných z různých metod měření

Z grafu je patrné, že všechny metody vystihují stejné chování vzorků, liší se pouze svou velikostí a to o 5–10 %. Nejmenší odchylky vykazuje metoda měření ultrazvukem, největší potom u hodnot vypočtených z vlastních frekvencí příčného kmitání. I zde jsou největší odchylky v rámci ± 1 MPa, což lze považovat za dostatečné. U všech měření vzorků sady K byly naměřeny hodnoty vyšší, než hodnoty určeny z destruktivních zkoušek viz kapitola 4.3.3. U sady O jsou u měření ultrazvukem zjištěné hodnoty nižší, než hodnoty z destruktivních

zkoušek. Vzhledem ke stálosti trendů u všech třech provedených dynamických měření je zde spíše důvodem nepřesnost vypočtených dynamických modulů u destruktivních zkoušek, kde tyto trendy nejsou zcela srovnatelné a skutečné hodnoty statického modulu by tedy měli být nižší, než bylo naměřeno.

4.2 Vyhodnocení výsledků nedestruktivních zkoušek

Z výsledků nedestruktivních zkoušek lze vidět, že obsah obou strusek má jednoznačný vliv na chování malty a to od počátku výrobního procesu. Zpracovatelnost malty se vzrůstajícím obsahem strusky narůstá. Toho by bylo možné využít a vodní součinitel u malty obsahující strusku snížit, což by mělo mít za následek vyšší konečnou pevnost.

Výsledky měření smrštění nejsou zcela průkazné. Trend, který zde byl pozorován, a sice že uložení vzorků do vody způsobí mírné prodloužení, následované opětovným smrštěním lze najít v jiných studiích na obdobné téma [Collins & Sanjayan, 1998]. Výsledky také poukazují na to, že zvyšující se obsah strusky způsobuje větší smrštění vzorků, což souhlasí s výsledky výše zmíněné studie. Nicméně zvolená metoda měření ale neposkytuje dostatečnou přesnost na to, aby bylo možné považovat výsledky za zcela průkazné. Pro budoucí studie by bylo vhodné použít přesnější způsob měření, například kombinací forem a tenzometrů.

Výsledky měření modulu pružnosti metodou pulzního buzení jsou svou přesností dostačující, jejich hlavní potenciální slabinou je zvolený časový úsek mezi měřeními a celkový časový úsek studie. V počátečních dnech by bylo vhodné zvýšit frekvenci měření, jelikož během prvního týdne dochází ve vzorcích k největším změnám a rozdíl mezi měřeními po dvou a devíti dnech, zejména u vzorku strusky O, je příliš velký pro určení přesného průběhu vývoje počátečních pevností. Je zde patrné, že mezi druhým a devátým dnem modul pružnosti u vzorků O10-O50 roste rychleji, než u kontrolní skupiny, ke konci měření úseku je zde náznak zpomalení tvrdnutí u vzorků O50, ten však může být způsoben chybou měření. U vzorků K10-K50 je tento nárůst přibližně stejně rychlý u všech vzorků. Jejich hodnoty modulu pružnosti zůstávají ve stejném poměru po celou dobu tuhnutí a není zde náznak, že by se tento trend měl s delším časovým úsekem měnit.

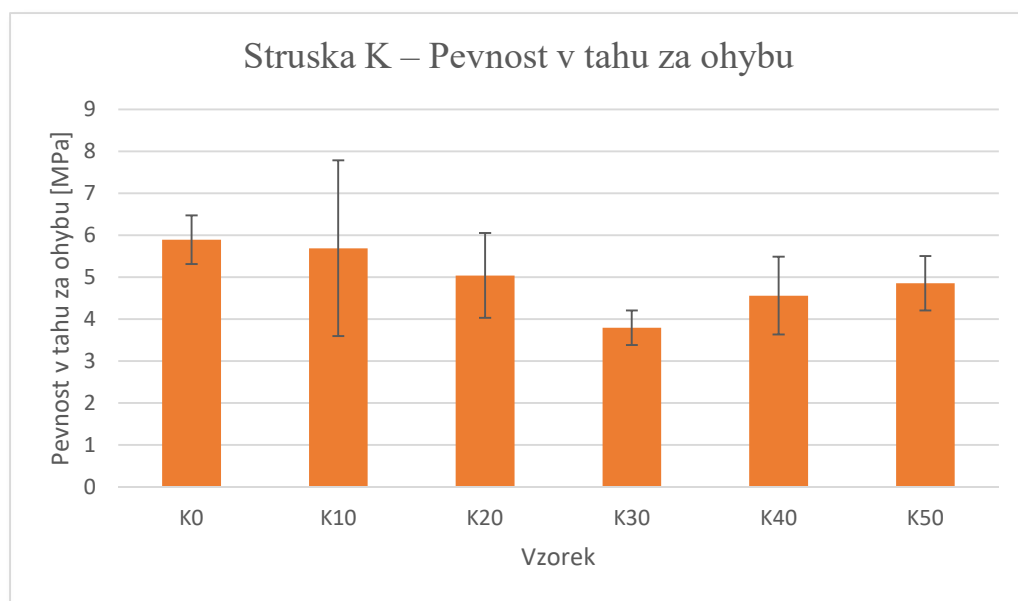
Všechna měření modulu pružnosti dynamickými metodami produkovala stejné trendy. Rozdíly ve velikosti u jednotlivých metod by mohli být vysvětleny nepřesností výpočtu Poissonova čísla, který je náchylný na přesné měření vzdáleností a nepravidelnost vzorků jej může značně ovlivnit. Z tohoto důvodu lze za nejpřesnější uvažovat modul pružnosti z vlastních frekvencí podélného kmitání, který na Poissonově čísle závislý není.

4.3 Destruktivní zkoušky

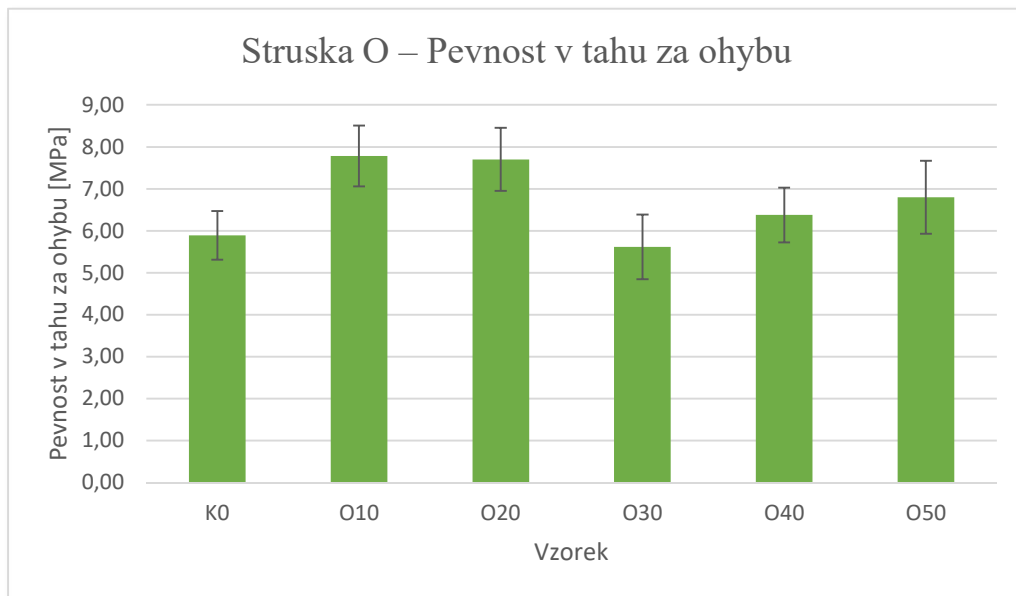
Destruktivní zkoušky zahrnovaly zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a zkoušku pevnosti v tlaku. Obě zkoušky byly provedeny 28 dní po zhotovení vzorků. Výsledky budou prezentovány ve formě vypočtených pevností (dle vzorců v kapitole 3.4.1), zprůměrovaných ze všech zkoušených vzorků z jedné sady, pokud není řečeno jinak. Doprovodnými údaji jsou zde směrodatné odchylky vypočtené v programu Excel funkcí STDEVA, v grafu jsou odchylky znázorněny úsečkami.

4.3.1 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Hodnoty naměřené u zkoušky tříbodovým ohybem jsou relativně rozptýlené (průměrná směrodatná odchylka je zde 14 %). U některých sad vzorků byla směrodatná odchylka až 37 %, což je pro hledání specifických trendů překážkou. Přesto jsou zde jisté závislosti patrné, viz následující grafy (Obrázek 4-15 a 4-15).



Obrázek 4-15 Graf – Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0; K10–K50)



Obrázek 4-16 Graf – Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0; O10–O50)

Z grafů si lze povšimnout, že u obou strusek dochází k propadu pevnosti v tlaku u 30% obsahu strusky. Nelze vyloučit, že je tento propad čistě náhodný, u obou strusek ale mají tyto hodnoty relativně srovnatelné výsledky u všech tří vzorků (viz odchylky v tabulkách 4-3 a 4-4), nemělo by se tedy jednat o propad způsobený například jednou vzdálenou hodnotou.

Struska K

Vzorek	Pevnost [MPa]	StDev [MPa]	StDev [%]
R0	5,9	0,58	9,8
K10	5,7	2,10	36,8
K20	5,0	1,01	20,1
K30	3,8	0,41	10,8
K40	4,6	0,93	20,4
K50	4,9	0,65	13,4

Tabulka 4-2 Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0; K10–K50)

Struska O

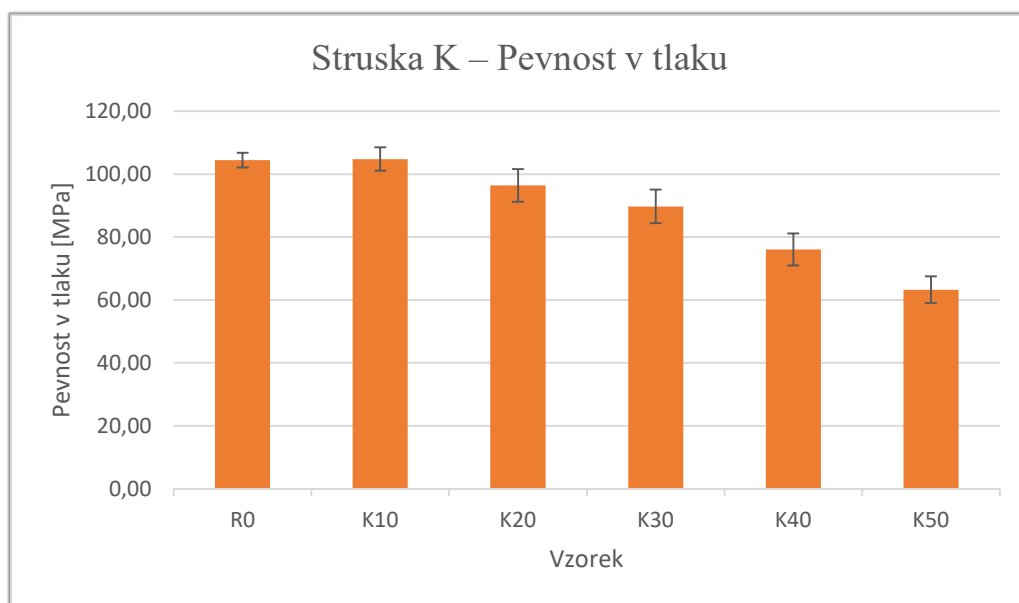
Vzorek	Pevnost [MPa]	StDev [MPa]	StDev [%]
R0	5,89	0,58	9,8
O10	7,78	0,72	9,3
O20	7,70	0,75	9,8
O30	5,62	0,77	13,7
O40	6,37	0,65	10,2
O50	6,80	0,87	12,8

Tabulka 4-3 Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0; O10–O50)

Největší rozptyl hodnot byl u vzorků K10, kde jednotlivé naměřené hodnoty činily 3,61 MPa, 7,80 MPa a 5,73 MPa. Rozptyl hodnot u této zkoušky může být způsoben více faktory, například vnitřní pórovitostí vzorků. Pro zpřesnění výsledků by bylo zapotřebí větších statistických souborů.

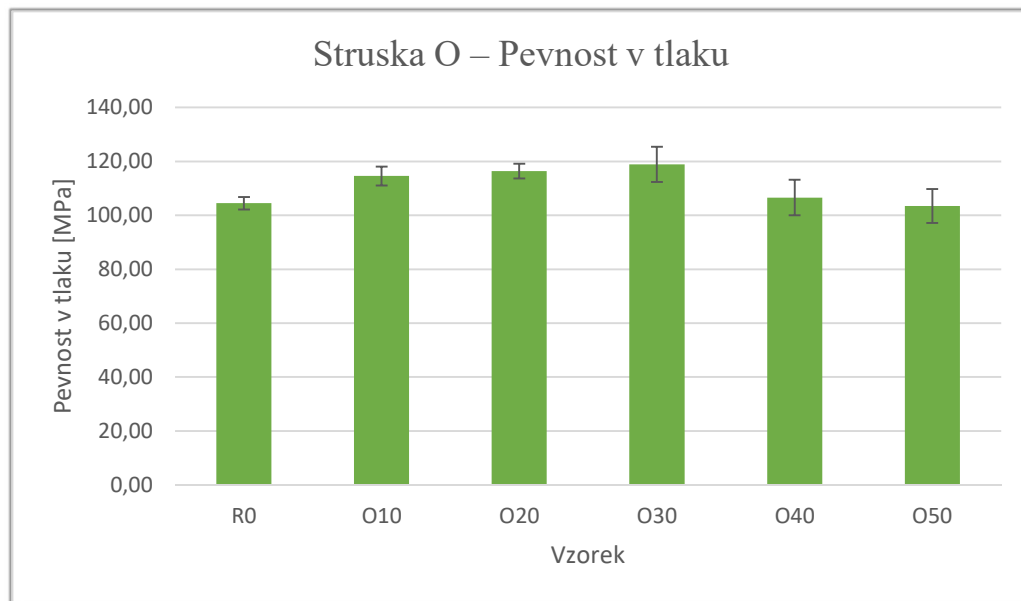
4.3.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Výsledky zkoušky byly průkaznější než u předchozí zkoušky tahové pevnosti. Výsledky také odpovídají měření metodou impulzního buzení, kde byl měřen modul pružnosti. Z každé sady bylo testováno pět vzorků. Presentované hodnoty pevnosti (Obr. 4-16 a 4-17) jsou aritmetickým průměrem všech pěti vzorků, s výjimkou sad R0 a O10, u kterých se jedno z měření výrazně lišilo od průměru, a tato hodnota byla tedy z výpočtu vyřazena.



Obrázek 4-17 Graf – Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0; K10–K50)

Chování je zde obdobné, jako u modulu pružnosti v kapitole 4.1.3. U strusky K se zvyšujícím se obsahem klesá pevnost, a to téměř lineárním způsobem. Při obsahu strusky 50 % klesla pevnost až na 60 % původní hodnoty.



Obrázek 4-18 Graf – Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0; O10–O50)

U strusky O naopak pevnost stoupá, a to až do obsahu 30 %, kde dosahuje o 13 % vyšší pevnosti v tlaku než kontrolní cement. U obsahu 40 a 50 % je pevnost malty srovnatelná s pevností cementu bez příměsí strusky. Následující tabulky (Tab. 4-5 a 4-6) obsahují konkrétní naměřené hodnoty a jejich směrodatné odchylky.

Struska K

Vzorek	Pevnost [MPa]	StDev [MPa]	StDev [%]
R0	104,5	2,4	2,3
K10	104,8	3,7	3,5
K20	96,4	5,2	5,3
K30	89,8	5,4	6,0
K40	76,1	5,1	6,7
K50	63,3	4,2	6,7

Tabulka 4-4 Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0; K10–K50)

Struska O

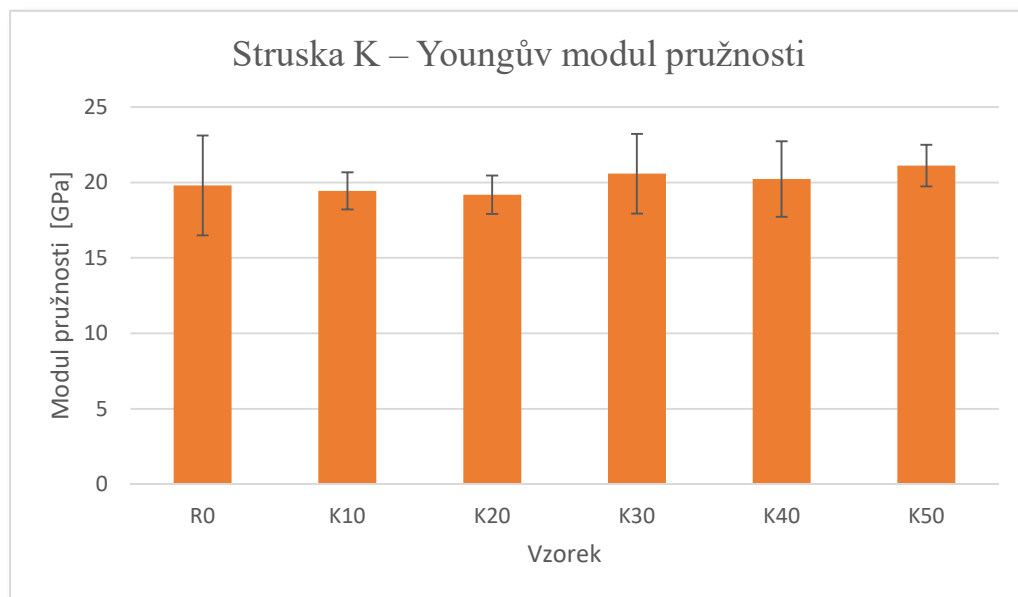
Vzorek	Pevnost [MPa]	StDev [MPa]	StDev [%]
R0	104,5	2,4	2,3
O10	114,6	3,5	3,1
O20	116,4	2,7	2,4
O30	118,9	6,5	5,5
O40	106,6	6,6	6,2
O50	103,5	6,3	6,1

Tabulka 4-5 Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0; O10–O50)

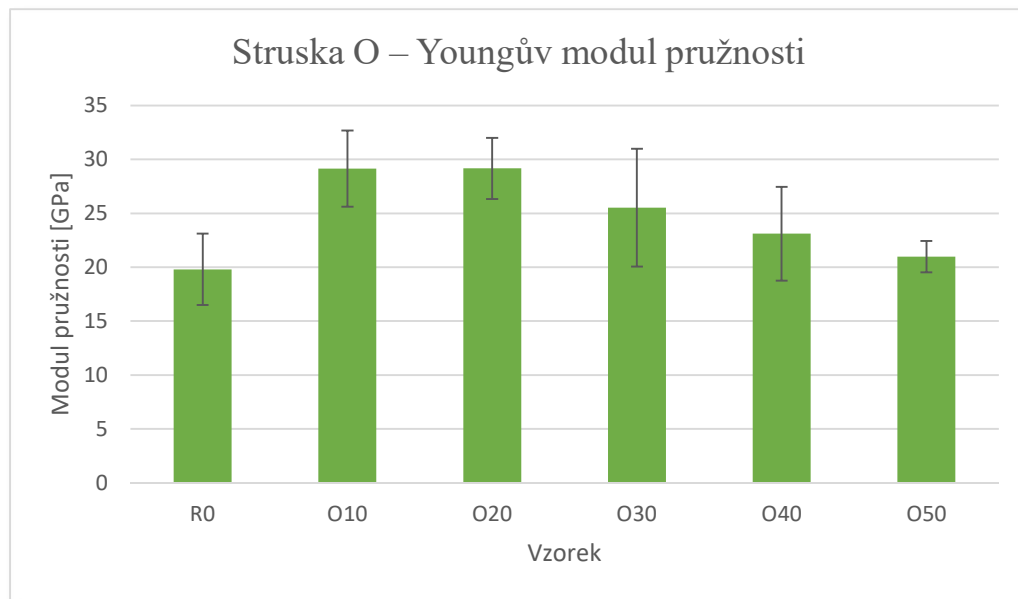
Průměrná směrodatná odchylka u této zkoušky činila 4,7 %, maximální směrodatná odchylka zde byla 6,7 % u vzorků K40 a K50. Extrémní hodnoty (více než $\pm 3\sigma$ od průměru) se vyskytly u vzorku R0, kde jedna z naměřených hodnot činila 73,6 MPa (průměr ostatních hodnot 104,5 MPa) a vzorku O10, naměřená hodnota 65,8 MPa (průměr 114,56 MPa). Tyto dvě hodnoty nebyly do výpočtů zahrnuty. Ostatní naměřené hodnoty spadaly do přípustného rozptylu.

4.3.3 Modul pružnosti z destruktivních zkoušek

Záměr zde byl určit modul pružnosti z průběhů zatížení a deformací zaznamenaných u destruktivních zkoušek, pro porovnání s dynamickými moduly pružnosti získanými z vlastních frekvencí metodou pulzního buzení. Problematickým se ukázalo rozlišení použitého lisu ($\pm 0,01$ mm) které při výšce vzorku 40 mm není zcela dostačující pro určení tečných modulů na začátku zatěžování. Následující hodnoty jsou vypočteny sečnou metodou mezi dvěma body. Při síle 20 kN (pro vyloučení odporu samotného lisu) a při 1/3 maximální dosažené síly (a příslušného poměrného přetvoření) každého vzorku. Výsledky (Obr. 4-19 a 4-20) mají relativně velký rozptyl, způsobený právě nedostatečnou přesností měření deformace.



Obrázek 4-19 Graf – Youngův Modul pružnosti vzorků z tlakové zkoušky (R0; K10-K50)



Obrázek 4-20 Graf – Youngův modul pružnosti vzorků z tlakové zkoušky (R0; O10–O50)

I přes relativní nepřesnost dat jsou výsledky u vzorků O10–O50 relativně srovnatelné s výsledky měření dynamického modulu pružnosti. Je zde opět trend, že je modul pružnosti vyšší, než je tomu u kontrolní skupiny. Je třeba uvážit, že dynamický modul pružnosti má téměř vždy být vyšší, než statický, vzorky O10 a O20 tedy mají pravděpodobně ve skutečnosti hodnotu nižší, než zde bylo vypočteno.

Méně průkazné jsou výsledky u vzorků K10–K50. U měření dynamického modulu pružnosti zde byl jasný trend, kdy se stoupajícím obsahem strusky modul pružnosti klesal. Zde je modul pružnosti relativně konstantní bez ohledu na složení vzorku. Pravděpodobnou příčinou je zde pouze nepřesnost měření, protože oba moduly by měly být relativně lineárně závislé [ČSN 73 2011] a je nepravděpodobné, že by se takto lišily na základě neznámých vlastností vzorků.

4.4 Vyhodnocení výsledků destruktivních zkoušek

Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu nejsou velmi průkazné. Nevyztužené vzorky malty se porušují křehkým lomem, což bylo umocněno volbou trojbodového ohybu. V kombinaci s relativně malým množstvím vzorků se takový výsledek dal očekávat. Zajímavým zde může být propad pevnosti u vzorků K30 a O30, pokud by se obdobný výsledek objevil u jiné studie. Primární účel zkoušky bylo tedy spíše získání více vzorků pro zkoušku tlakové pevnosti, která je pro využití ve výrobcích z betonu zásadnější.

U zkoušky tlakové pevnosti se potvrdily trendy patrné z měření dynamického modulu pružnosti. Struska K svou přítomností pevnost v tlaku snižuje o až o 40 % při náhradě 50 % cementu struskou. Objemová hmotnost vzorků (kapitola 4.1.2) s obsahem strusky také klesá. Je tedy pravděpodobné, že vnitřní pórovitost vzorků s obsahem strusky narůstá, což by mohlo vysvětlit pokles pevnosti v tlaku i tahu za ohybu. Vývoj modulu pružnosti nenaznačuje, že by se tento trend měl v delším horizontu měnit. Dlouhodobější studie ukazují, že se pevnost v tlaku u malt s obsahem ocelářské strusky se po letech může mírně pevnosti v tlaku cementu přiblížit, zůstává však po celou dobu nižší [Wang et al., 2013].

U vzorků se struskou O se opět projevil pozitivní vliv na mechanické vlastnosti. Nárůst pevnosti v tlaku oproti cementu CEM-I 42,5 R zde činil $\div 13$ % u vzorků O20 a O30. Vliv by mohl být zdůrazněn snížením vodního součinitele, případně některou z forem alkalické aktivace. Samotný fakt, že struska zlepšuje vlastnosti betonu bez dalších úprav, z ní tvoří vhodný materiál pro další výzkum. Vhodné by zde bylo zejména sledování dlouhodobých vlastností.

4.5 Vyhodnocení strusek dle ČSN EN 15167-1

Norma ČSN EN 15167-1 specifikuje požadavky na mletou granulovanou strusku použitou jako přísadu typu II do výrobků z betonu z hlediska chemických a fyzikálních vlastností. Mletá granulovaná vysokopecní struska vyhovující této normě může být použita také do malt a injektážních malt. Norma nespécifikuje požadavky na uložení vzorků. Uložení vzorků ve vodě, použité u této studie by tedy nemělo ovlivnit závěr.

4.5.1 Chemické složení

Chemické složení strusek bylo analyzováno v kapitole 3.1.1 na základě výsledků XRD analýzy. Primárním požadavkem normy je, že se chemické složení musí sestávat minimálně ze dvou třetin hmotnost z oxidu vápenatého (CaO), oxidu hořečnatého (MgO) a oxidu křemičitého (SiO₂) a poměr (CaO + MgO)/(SiO₂) musí být větší než 1. Dle dostupných dat (Tabulka 3-4) je tento poměr u obou vzorků vyhovující. Celková hmotnost požadovaných tří složek tvoří u strusky K 66,2 % hmotnosti, u strusky O pak 64,4 % hmotnosti. XRD analýza poskytuje pouze semi-kvantitativní zastoupení jednotlivých složek, pro definitivní prohlášení požadavku 66,6 % hmotnosti za splněný nebo nesplněný je tedy za potřeby přesnější chemické analýzy.

4.5.2 Jemnost

Jemnost strusky je definována měrným povrchem, který nesmí být menší než 275 m²/kg, přičemž měrný povrch je zde stanoven permeabilní metodou. Měření měrného povrchu nebylo v rámci této studie provedeno, nelze tedy splnění požadavku potvrdit. Vzhledem k úpravě strusky vysokorychlostním mletím a chování při výrobě směsí lze pouze konstatovat, že by obě strusky měly mít měrný povrch větší, než referenční cement (min. 300 m²/kg) a požadavek bezpečně splnit.

4.5.3 Index účinnosti

Index účinnosti je vyjádřen v procentech jako poměr pevnosti v tlaku směsi 50 % hmotnosti strusky a 50 % zkušební cementu k pevnosti v tlaku samotného zkušební cementu, tedy referenčního vzorku. U obou směsí musí být vodní součinitel 0,5. Požadovaný index účinnosti je 45 % po sedmi dnech a 70 % po 28 dnech [ČSN EN 15167-1].

V rámci studie nebyly provedeny zkoušky v tlaku po sedmi dnech. Bylo zde však ukázáno, viz kapitoly 4.1.4 a 4.3.2, že modul pružnosti z dynamických měření velmi dobře koreluje s pevností betonu v tlaku po 28 dnech. Za předpokladu, že Youngův modul pružnosti a pevnost betonu v tlaku zůstávají ve stejném poměru, lze pevnost po sedmi dnech odhadnout.

Po 28 dnech činila pevnost v tlaku referenční sady R0 104,5 MPa, sady K50 63,3 MPa a u sady O50 byla 103,5 MPa (Tab. 4-5 a 4-6). Index účinnosti u strusky K je tedy 60,6 %, u strusky O pak 99 %. Struska K tedy nesplňuje požadavek indexu účinnosti po 28 dnech alespoň 70 %. Struska O požadavek bezpečně splňuje.

Youngův modul pružnosti byl měřen při stáří vzorků 2 a 9 dní. Po celou dobu sledování vzorků modul pružnosti narůstal a je nepravděpodobné, že by mezi tímto obdobím dramaticky klesl. Pokud tedy struska splňuje podmínku indexu účinnosti po dvou i devíti dnech, lze předpokládat, že ji bude splňovat i po sedmi dnech.

Konečný poměr modulů pružnosti vzorků K50 ku R0 byl roven 78,8 % a poměr jejich pevností v tlaku činil 60,6 %. Poměr modulů pružnosti vzorků O50 ku R0 po dvou dnech činil 82,5 % a po devíti dnech 102,8 %. Lze tedy předpokládat, že index účinnosti po dvou dnech by u vzorků O50 neměl výrazně klesnout pod 60 %, po devíti dnech by se měl blížit hodnotě 100 %. Obě tyto hodnoty naznačují, že by struska měla požadavku normy (index účinnosti ≥ 45 %) bezpečně vyhovět i u sedmidenních pevností.

5 Závěr

Z provedených experimentů provedených v rámci této práce lze přímo konstatovat, že pro dva testované vzorky strusky platí následující zjištění:

- Vysokopeční struska, značena „O“, měla u vzorků pozitivní dopad na pevnost v tlaku malty po sedmi a více dnech od výroby. Pevnost v prvních dvou dnech s obsahem strusky lineárně klesá.
- Ocelářská struska, značena „K“, měla u vzorků na pevnost v tlaku malty dopad negativní minimálně v celém prvním měsíci od výroby.
- Obě strusky mají pozitivní vliv na zpracovatelnost čerstvé malty, přičemž tento vliv je výraznější u strusky vysokopeční, značené „O“.

Výše zmíněná zjištění platí pro konstantní vodní součinitel u všech vzorků a uložení vzorků do vody během zrání. Vysokopeční struska se tedy jeví jako vhodnější náhrada cementu, při absenci dalších úprav, což bylo potvrzeno kapitolou 4.5.3, kdy na rozdíl od strusky K, pravděpodobně vyhovuje podmínkám stanoveným normou ČSN EN 15167-1. Vysokou jemnost strusky by mělo být možné využít snížením vodního součinitele, při zachování konzistence, pro dosažení ještě vyšších pevností.

Pro detailnější studii příčin zvýšení pevnosti v tlaku je potřeba dodatečný výzkum, zejména chemického složení jednotlivých vzorků. Měrný povrch obou strusek by měl být přibližně stejný, příčina odlišného chování by tedy měla být právě v chemickém složení. Vhodné by bylo například:

- Přesné změření měrného povrchu Blainovou metodou.
- Určení přesného chemického složení a zastoupení skelné fáze u obou vzorků jednou z dostupných metod (viz kap. 3.1.1).
- Ověření, zda trendy vysledované v této studii lze aplikovat i pro vzorky uskladněné na vzduchu.
- Dlouhodobější sledování vývoje materiálových vlastností stejných nebo obdobných směsí.
- Provedení analýzy mikroskopické struktury malt za účelem vysvětlení rozdílného chování strusky a cementu při tuhnutí.

Ukázalo se také, že metody použité pro měření dynamického modulu pružnosti vykazují identické trendy (Viz kap. 4.1.5), což poukazuje na jejich relativní přesnost. Slabinou u těchto metod je zejména určení Poissonova čísla, které je závislé na přesných měřeních délkových rozměrů a pravidelnosti tvaru vyrobených vzorků. Z těchto metod se tedy jako nejprůkaznější pro použité rozměry a materiál vzorků jeví výpočet modulu pružnosti z vlastních frekvencí podélného kmitání, ve kterém není Poissonovo číslo používáno.

Na závěr je třeba zmínit, že ačkoliv ocelářská struska K nesplňuje normu ČSN EN 15167 pro použití jako přísada do betonu, je možné pro tento materiál dále hledat uplatnění ve stavebním průmyslu. Jednou z možností jsou například alkalicky aktivovaná pojiva, u kterých se právě tyto strusky jeví jako jeden z perspektivních materiálů pro další výzkum.

Literatura

ASTM International. *Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM International, 2002.

BOTVINKIN, O. K. *About Multiplicity in Glasses Structure*, 1955.

BUDNIKOV, P. P.; GORSHKOV, V. S. *To a Question on the Use of Alumothermic Slags*. *Stroitelnye Materialy*, Moskva, 1965, 18-20.

COALE, R. D.; WOLHUNTER, C. W.; JOCHENS, P. R.; HOWAT, D. D. *Cementitious properties of metallurgical slags*. *Cement and Concrete Research*, 1973.

COLLINS, F. G.; SANJAYAN J. G. *Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete*, 1998.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *Steelmaking. Physical properties of slags*. Technical Steel Research. Commission of the European Communities, 1981.

DAVIDOVITS, J. *Properties of geopolymers cements*, 1994.

DEMOULIAN, E.; GOURDIN, P.; HAWTHORN, F.; VERNET, C. *Influence of Slags Chemical Composition and Texture on their Hydraulicity*. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, France, III-89-94, 1978.

DROCHYTKA, R.; MATULOVÁ, P. *Lehké stavební látky*. Vysoké učení technické v Brně, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavement*. US Department of Transportation, 2012.

GLUKHOVSKY, V. D.; ROSTOVSKAYA, G. S.; RUMYNA G. V. High strength slag-alkali cement. 7th International Congress on the Chemistry of Cements, 1980.

GRUBEŠA, I. N.; BARISIC, I.; FUCIC, A.; BANSODE, S. S. *Blastfurnace and Steel Slag: Production, Properties, and Uses*. Amsterdam: Woodhead Publishing, 2016.

GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; HOLZER, L.; FIGI, R.; WINNEFELD, F. *Hydration of alkali-activated slag: Comparison with ordinary Portland cement*. *Advances in Cement Research*, 2016.

- HLAVINKOVÁ, E. *Potenciální náhrada vysokopecní strusky ve směsných portlandských cementech*. Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- MONOSI, S.; RUELLO, M. L.; SANI, D. *Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production*. Cement and Concrete Composites 66, 2016.
- MONSHI, A.; ASGARANI, M. K. *Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone*. Cement and Concrete Research 29, 1999.
- NATIONAL SLAG ASSOCIATION. *Fire Resistance and Heat Transmission Properties of Concrete and Masonry Made with Blast Furnace Slag Aggregate*. National Slag Association, 1971.
- ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. *Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review*. Construction and Building Materials 105, 2016.
- PACHECO-TORGAL F., CASTRO-GOMES J., JALALI S., *Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders*, 2007.
- PRASSIANAKIS, N. I., *Ultrasonic testing of non-metallic materials: concrete and marble*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 42, Issue 2, 2004, 191-198, ISSN 0167-8442
- PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. *Alkali-activated fly ashes. A cement for the future*. Cement and Concrete Research 29, 1999.
- REGOURD, M. *Slags and slag cements. Cement replacement materials*. Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, 1986.
- SETIÉN, J.; HERNÁNDEZ, D.; GONZÁLEZ, J. J. *Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material*. Construction and Building Materials 23, 2009.
- SHI, C. *Steel Slag – Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004.
- SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Taylor & Francis Group, 2006. ISBN10: 0-415-70004-3. 30-64, 84-106, 150-156, 293-298

SCHWIETE, H. E.; DOLBOR , F. *The Effect of Cooling Conditions and the Chemical Composition on the Hydraulic Properties of Haematic Slags*. Forsschungbericht Des Landes, 1963

SMOLCZYK, H. G. *Slag Structure and Identification of Slags*. 7th Internation Congress on the Chemistry of Cement, Paris, France, 1978, 294-296.

ŠMILAUER, V.; ZOBAL, O.; BITTNAR, Z.; HELA, R.; SNOP, R.; DONÁT, P. *Využití úletových popílků pro betonáž masivních konstrukcí*. Věda a výzkum, 2014.

TAYLOR, M.; TAM, C.; GIELEN, D. *Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry*. International Energy Agency, 2006.

TOPIČ, J.; PROŠEK, Z.; INDROVÁ, K.; PLACHÝ, T.; NEŽERKA, V.; KOPECKÝ, L.; TESÁREK, P. *Effect of PVA Modification on the Properties of Cement Composites*. Czech Technical University in Prague, 2015.

TSAKIRIDIS, P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D.; TSIVILIS, S.; KORONEOS, C. *Utilization of steel slag for Portland cement clinker production*. Journal of Hazardous Materials 152, 2008.

VAN OSS, H. G. *Slag – Iron and Steel*. US Geological Survey Minerals Yearbook, 2002.

VAN OSS, H. G. *US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries*, 2014.

YUAN, X. H.; CHEN, W.; LU, Z. A.; CHEN, H. *Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis*. Construction and Building Materials 66, 2014.

VYHLÁŠKA č. 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů, 23.3.2016

WANG, Q.; YANG, J.; YAN, P. *Cementitious properties of super-fine steel slag*. Powder Technology 245, 2013.

WORLD STEEL ASSOCIATION. *Crude steel production Jan-Oct 2016 vs. 2015*. [<https://www.worldsteel.org/statistics/crude-steel-production0.html>]

Seznam tabulek

Tabulka 1-1 Orientační hodnoty chemického složení různých druhů metalurgických strusek (% hmotnosti).....	11
Tabulka 1-2 Hydraulické moduly strusky [Smolezyk 1978, 1980, Shi 1987].....	16
Tabulka 3-1 Závěr XRD analýzy vzorku K	31
Tabulka 3-2 Závěr XRD analýzy vzorku O	32
Tabulka 3-3 Chemické složení minerálů identifikovaných ve vzorcích strusky [webmineral.com, 2016]	33
Tabulka 3-4 Chemické složení krystalických fází vzorků strusky.....	33
Tabulka 3-5 Hmotnostní složení vzorků	35
Tabulka 4-1 Tabulka naměřených rozlití malt s různou konzistencí (hodnoty v mm)	48
Tabulka 4-3 Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0–K50).....	60
Tabulka 4-4 Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0–O50).....	60
Tabulka 4-5 Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0–K50)	62
Tabulka 4-6 Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0–O50)	62

Seznam použitých norem

ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí

ČSN EN 1015-3 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku)

ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles

ČSN EN 15167-1, 2006 Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody

ČSN EN 15167-2, 2006 Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Hodnocení shody

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

ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití

ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

Seznam obrázků

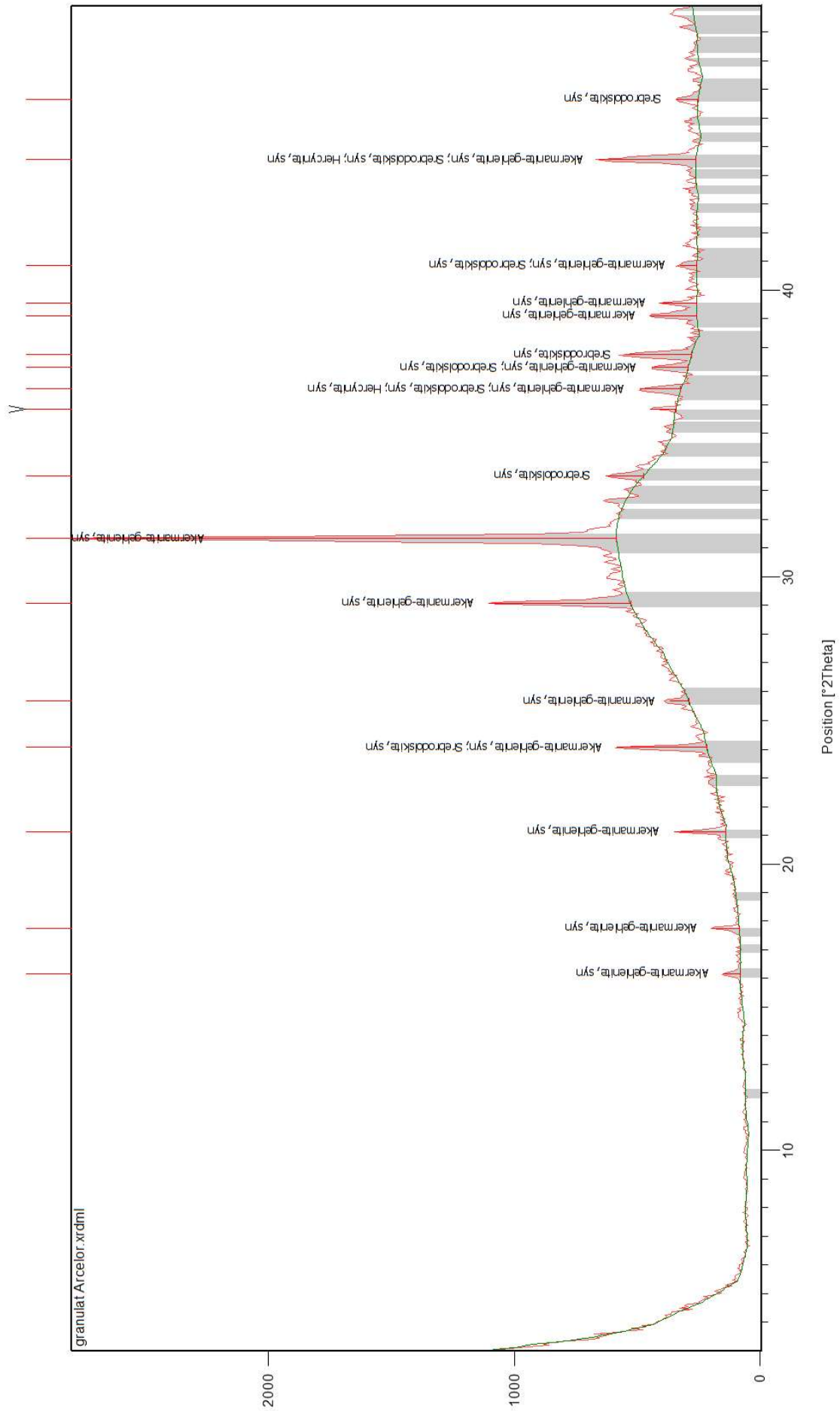
Obrázek 1-1 Schéma vysoké pece [www.chemistrysources.com]	8
Obrázek 1-2 Schéma konvertorové (BOF) a obloukové pece (EAF) [Shi, 2004].....	9
Obrázek 1-3 Vysokopecní struska chlazená vzduchem (Air-cooled blast furnace slag) [www.euroslag.org].....	13
Obrázek 1-4 Granulovaná vysokopecní struska [www.emaze.com].....	14
Obrázek 1-5 Mikroskopická struktura hydratace - vlevo běžný cement, vpravo alkalicky aktivované pojivo [Shi et al., 2006].....	23
Obrázek 1-6 Tři typy struktury geopolymérů – PS, PSS, PSDS [Davidovits, 1994].....	24
Obrázek 3-1 Schéma XRD analýzy [ksanalytical.com]	29
Obrázek 3-2 Příklad skládání jednotlivých vzorů do výsledné refrakční křivky [prism.mit.edu/xray/].....	30
Obrázek 3-3 Výsledná refrakční křivka XRD analýzy proložená referenčními vzory – Struska K.....	31
Obrázek 3-4 Výsledná refrakční křivka XRD analýzy proložená referenčními vzory – Struska O.....	32
Obrázek 3-5 Schéma setřásacího stolku dle ČSN EN 1015-3.....	37
Obrázek 3-6 Sestava měřicí stanice.....	39
Obrázek 3-7 Schéma konfigurace měřících zařízení na vzorku	39
Obrázek 3-8 Výstup měření z programu PULSE Labshop	40
Obrázek 3-9 Vývojový diagram výpočtu modulů pružnosti iteračním způsobem [ATSM, 2006]	44
Obrázek 3-10 Fotografie - Uložení zkušební vzorku do lisu.....	45
Obrázek 3-11 Fotografie – ukončení ohybové zkoušky	46
Obrázek 3-12 Fotografie - porušení vzorků	46
Obrázek 3-13 Fotografie - Vzorek po ukončení zkoušky tlakové pevnosti	47
Obrázek 3-14 Fotografie - Vzorek připravený na zkoušku tlakové pevnosti.....	47
Obrázek 4-1 Graf – Rozlití čerstvé malty v závislosti na obsahu strusky po 10 a 20 sklepnutích.....	48
Obrázek 4-2 Graf – Objemová hmotnost vzorků (R0; K10–K50).....	49
Obrázek 4-3 Graf – Objemová hmotnost vzorků (R0; O10–O50).....	49
Obrázek 4-4 Graf - Poměrné smrštění v čase – Vzorky R0; K10-K50	50
Obrázek 4-5 Graf - Poměrné smrštění v čase – Vzorky R0; O10-O50	51
Obrázek 4-6 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; K10-K50; Stáří 2 dny).....	52
Obrázek 4-7 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; O10-O50; Stáří 2 dny).....	52
Obrázek 4-8 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; K10-K50; Stáří 9 dní).....	53
Obrázek 4-9 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; O10-O50; Stáří 9 dní).....	53
Obrázek 4-10 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; K10-K50; Stáří 27 dní).....	54
Obrázek 4-11 Graf - Naměřené hodnoty modulů pružnosti (R0; O10-O50; Stáří 27 dní).....	54
Obrázek 4-12 Graf - Vývoj Youngova modulu pružnosti (R0; K10–K50).....	55
Obrázek 4-13 Graf - Vývoj Youngova modulu pružnosti (R0; O10–O50).....	56

Obrázek 4-14 Graf – Srovnání modulů pružnosti získaných z různých metod měření.....	57
Obrázek 4-15 Graf – Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0; K10–K50)	59
Obrázek 4-16 Graf – Výsledky zkoušky tahové pevnosti za ohybu (R0; O10–O50)	60
Obrázek 4-17 Graf – Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0; K10–K50).....	61
Obrázek 4-18 Graf – Výsledky zkoušky tlakové pevnosti (R0; O10–O50).....	62
Obrázek 4-19 Graf – Youngův Modul pružnosti vzorků z tlakové zkoušky (R0; K10-K50)	63
Obrázek 4-20 Graf – Youngův modul pružnosti vzorků z tlakové zkoušky (R0; O10-O50).....	64

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 - VÝSLEDEK XRD ANALÝZY – VZOREK OSTRAVA.....	P1
PŘÍLOHA 2 - VÝSLEDEK XRD ANALÝZY – VZOREK Kladno.....	P2

PŘÍLOHA 1 – VÝSLEDEK XRD ANALÝZY – VZOREK O



PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDEK XRD ANALÝZY – VZOREK K

