

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

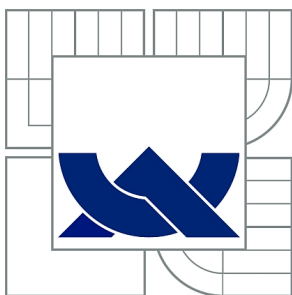
MOŽNOSTI VYUŽITÍ PLASTIFIKÁTORŮ A SUPERPLASTIFIKÁTORŮ V
ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMECH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

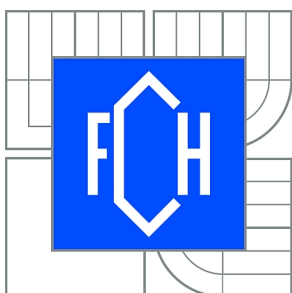
MARKÉTA LANGOVÁ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

MOŽNOSTI VYUŽITÍ PLASTIFIKÁTORŮ A SUPERPLASTIFIKÁTORŮ V ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMECH

POSSIBILITIES OF USING PLASTICIZERS AND SUPERPLASTICIZERS IN ALKALI-ACTIVATED SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARKÉTA LANGOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ KALINA, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	FCH-BAK0846/2014	Akademický rok: 2014/2015
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Markéta Langová	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.	
Konzultanti:	Ing. Jiří Másilko, Ph.D.	

Název bakalářské práce:

Možnosti využití plastifikátorů a superplastifikátorů v alkalicky aktivovaných systémech

Zadání bakalářské práce:

literární rešerše

využití chemických přísad ovlivňující zpracovatelnost alkalicky aktivovaných pojiv
vysvětlení mechanismu působení plastifikačních přísad

Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2015

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Markéta Langová
Student(ka)

Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 30.1.2015

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá přípravou a vlastnostmi alkalicky aktivované vysokopecní strusky po přidání různých druhů plastifikátorů a superplastifikátorů v různém procentuelním zastoupení. Cílem této práce je nalézt vhodný plastifikátor nebo superplastifikátor, který by zlepšil jak zpracovatelnost, tak mechanické vlastnosti alkalicky aktivované strusky.

Dále byl posouzen vliv těchto příměsí na pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Na závěr se pomocí infračervené spektrometrie studuje chování plastifikačních přísad v alkalickém prostředí.

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with the preparation and properties alkali activated blast furnace slag after addition of the different types of plasticizers and superplasticizers with the different weight percentage amount. The aim of this thesis is to find suitable plasticizers or superplasticizers which would improve both workability and mechanical properties of alkali activated blast furnace slag.

The effect of these admixtures on compressive and flexural strength was determined. In conclusion the behaviour of plasticizing admixtures in alkaline environment through the infrared spectrometry is studied.

KLÍČOVÁ SLOVA

Alkalická aktivace, vysokopecní struska, superplastifikátor

KEYWORDS

Alkali activation, blast furnace slag, superplasticizer

LANGOVÁ, M. *Možnosti využití plastifikátorů a superplastifikátorů v alkalicky aktivovaných systémech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Kalina, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Kalinovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Centru materiálového výzkumu za poskytnutí potřebného materiálu a přístrojového vybavení.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1 Charakteristika alkalicky aktivovaných systémů	8
2.1.1 Struktura	8
2.2 Alkalicky aktivovaná struska	9
2.2.1 Vysokopecní struska	9
2.2.2 Alkalické aktivátory	9
2.2.3 Mechanismus alkalické aktivace vysokopecní strusky	10
2.3 Plastifikátory a superplastifikátory	11
2.3.1 Základní typy superplastifikátorů	12
2.3.1.1 Naftalenové superplastifikátory	12
2.3.1.2 Melaminové superplastifikátory	12
2.3.1.3 Lignosulfonátové plastifikátory	13
2.3.1.4 Polyakryláty (polykarboxyláty)	13
2.3.2 Mechanismus působení superplastifikátorů	14
2.3.3 Superplastifikátory v alkalicky aktivovaných systémech	15
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	17
3.1 Použité materiály	17
3.2 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku	17
3.2.1 Příprava vzorků	17
3.2.2 Stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu	17
3.3 Infračervená spektrometrie superplastifikátorů	17
3.3.1 Příprava a měření vzorků	18
4. VÝSLEDKY A DISKUSE	19
4.1 Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a rozliv	19
4.1.1 Alkalicky aktivovaná struska bez přídavku superplastifikátoru	19
4.1.2 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi polynaftalenu	19
4.1.3 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi polymelaminů	21
4.1.4 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů	23
4.1.5 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů	25
4.1.6 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu	28
4.1.7 Vliv přídavku plastifikátoru na bázi lignosulfonátu	30

4.1.8	Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi modifikovaných naftalenů.....	32
4.1.9	Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů	34
4.2	Infračervená spektra různých typů superplastifikátorů	36
4.2.1	Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi polynaftalenu.....	36
4.2.2	Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi polymelaminu.....	37
4.2.3	Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů....	38
4.2.4	Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polynaftalenů.....	39
4.2.5	Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů.....	40
5.	ZÁVĚR.....	41
6.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42

1. ÚVOD

Tématem bakalářské práce jsou možnosti využití plastifikátorů a superplastifikátorů v alkalicky aktivovaných systémech. Alkalicky aktivované systémy jsou nyní moderními materiály, které by mohly v budoucnu částečně nahradit portlandský cement.

S cílem snížit spotřeby neobnovitelných surovin a zároveň zvýšit používání vedlejších produktů se výzkum v poslední době zaměřuje na alkalicky aktivované materiály.

Dlouhá léta je nejpoužívanějším stavebním materiálem portlandský cement. S nárůstem lidské populace roste spotřeba tohoto materiálu a s tím také obrovská zátěž na životní prostředí těžbou výchozích surovin, spotřebou energetických zdrojů na jejich zpracování a množství oxidu uhličitého produkovaného při výrobě. A proto se vědci snaží nalézt náhradu portlandského cementu, která by splňovala podmínky stavebního materiálu.

Jednou takovou alternativní náhradou jsou právě alkalicky aktivované systémy, které prokázaly srovnatelné vlastnosti a významné snížení emisí oxidu uhličitého ve srovnání s portlandským cementem [1]. Pro alkalickou aktivaci lze použít vedlejší suroviny obsahující aktivní hlinitokřemičitany jako hlavní složku pojivového systému. Jedná se zejména o strusku a popílký, které v alkalickém prostředí vytváří pojivo podobné hydratovanému cementu.

V dnešní době jsou superplastifikátory běžně používány v technologii betonu pro zlepšení zpracovatelnosti. Na jedné straně umožňují výrobu betonu se speciálními vlastnostmi, jako je například samozhutnění betonu. Na druhé straně umožňují přípravu betonové směsi s nízkým poměrem voda/cement. Zpracovatelnost cementových past, betonů a malt obsahující superplastifikátory závisí na typu, chemickém složení a molekulární struktuře příměsí [2]. Úkolem této práce je zjistit jak superplastifikátory ovlivňují zpracovatelnost alkalicky aktivované vysokopecní strusky.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Charakteristika alkalicky aktivovaných systémů

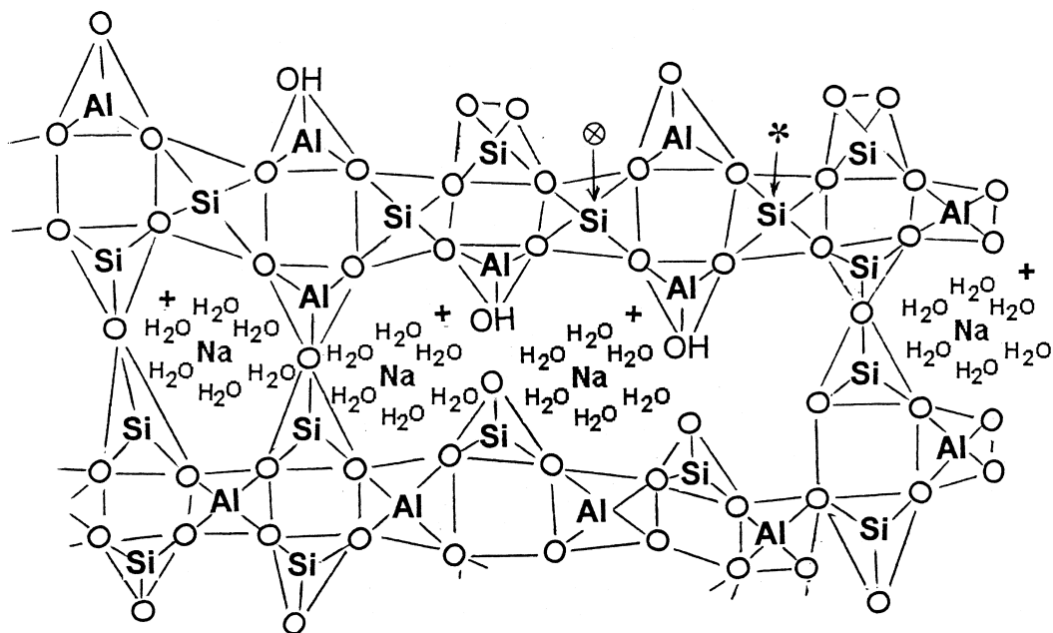
Alkalicky aktivovaný systém je tvořen alkalickým aktivátorem a látkou, která je schopna v přítomnosti aktivátoru vytvořit pojivo, je to například: vysokopeční struska, ocelářská struska, popílek, metakaolin nebo jejich kombinace [3]. Alkalicky aktivované systémy jsou anorganické materiály, připravované alkalickou aktivací aluminosilikátových materiálů a následnou polykondenzační reakcí. Obecný vzorec alkalicky aktivovaných systémů je $M_n[-(\text{Si-O})_z-\text{Al-O}]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, kde M je kationt alkalického kovu (Na, K, Ca), n je stupeň polykondenzace a z je poměr $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ [4].

Pokud ^{27}Al NMR spektra má pík při 55 ppm a Al se nachází pouze v koordinaci 4, je alkalicky aktivovaný systém nazýván geopolymery (podle Davidovitse) [5]. Pokud hliník není v koordinaci 4, produkt se nesmí nazývat geopolymery, ale pouze alkalicky aktivovaný materiál. Tato velice přísná formulace zahrnuje jen materiály, které vznikly alkalickou aktivací čistého metakaolinu. Dnes se vžil název „geopolymery“ a obecně se používá pro všechny alkalicky aktivované aluminosilikáty. Jejich společným rysem je amorfní trojrozměrná mikrostruktura s náhodným uspořádáním hlinitanových a křemičitanových tetraedrů s kationtem alkalického kovu kompenzující náboj $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ [6].

2.1.1 Struktura

Název „polysialátů“ byl navržen profesorem Davidovitsem pro chemické označení geopolymery. Sialát označuje zkratku oxidu hlinitokřemičitanu a je tvořen tetraedrálními anionty $[\text{SiO}_4]^{4-}$ a $[\text{AlO}_4]^{5-}$ sdílejících kyslík, který vyžaduje pozitivní ionty jako je například K^+ , Na^+ , Li^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} [7].

Alkalicky aktivované systémy mají amorfní trojrozměrnou mikrostrukturu, v níž jsou aluminátové a silikátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány přes kyslíkový můstek.



Obrázek 1: Struktura alkalicky aktivovaného materiálu [8]

2.2 Alkalicky aktivovaná struska

2.2.1 Vysokopecní struska

Při výrobě železa ve vysoké peci vzniká jako vedlejší produkt vysokopecní granulovaná struska. Do vysokopecní strusky přecházejí také nečistoty, které jsou obsaženy v koksu a v železné rudě. Určitá kombinace nečistot má vliv na teplotu tavení směsi, kterou mohou zvyšovat, to je ovšem neekonomické [9]. Granulovaná vysokopecní struska se řadí mezi látky latentně hydraulické, což jsou látky, které samy o sobě netvrdnou ani netuhnou po přidání vody. Naopak po přidání určitého množství aktivátoru neboli budiče se začnou projevovat určité hydraulické vlastnosti.

Tabulka č. 1: Typické složení některých vysokopecních strusek [9]

	Francie	Severní Amerika	ČR
SiO ₂	29–36 %	33–42 %	25–45 %
Al ₂ O ₃	13–19 %	10–16 %	4–15 %
CaO	40–43 %	36–45 %	26–45 %
Fe ₂ O ₃	< 4 %	0,3–20 %	< 1,5 %
MgO	< 6 %	3–12 %	4–15 %
S ⁻	< 1,5 %	–	< 3 %

Rychlost chlazení struskové taveniny ovlivňuje fázové složení. Krystalický materiál vzniká pomalým chlazením struskové taveniny. Hlavní složkou krystalického materiálu je melilit, což je pevný roztok gehlenitu (2CaO · Al₂O₃ · SiO₂) a akermanitu (2CaO · MgO · 2SiO₂). Krystalická fáze nemá hydraulické vlastnosti a proto je vhodná jako kamenivo do betonu. Rychlým chlazením vzniká skelná fáze. Pro alkalickou aktivaci je vhodná struska s vysokým obsahem skelné fáze [10].

Vysokopecní struska má plno výborných vlastností. Má chemické složení, které se moc nemění a leží v dobře definovaných mezích v SiO₂ - CaO - Al₂O₃ fázovém diagramu. Dobře vyhašená struska má béžovou, světle žlutou nebo šedou barvu, kdežto pomalu chlazená struska má mnohem tmavší barvu. Rentgenovou difrakční analýzou lze zjistit, zda je struska dobře vyhašená [9, 11].

2.2.2 Alkalické aktivátory

Nejpoužívanější alkalické aktivátory jsou hydroxid sodný (NaOH), hydroxid draselný (KOH), sodné vodní sklo (n SiO₂ · Na₂O) nebo draselné vodní sklo (n SiO₂ · K₂O). Roztoky alkalických uhličitů jsou méně časté [12].

Hydroxidy draselné a sodné ve formě bílých peciček jsou leptavé, hygroskopické chemické látky, dobře rozpustné v ethanolu a ve vodě. Hydroxidy leptají porcelán i sklo. Vyrábí se reakcí hydroxidu vápenatého s uhličitany nebo elektrolýzou roztoků chloridů.

Vodní sklo je koloidní roztok alkalických křemičitanů, který vzniká rozpuštěním alkalickokřemičitého skla (nejčastěji sodného) ve vodě. U průmyslově vyráběného sodnokřemičitého skla je molární poměr obou složek 1,0 Na₂O : 2,0 až 3,3 SiO₂ a to odpovídá obsahu 66 – 76 hmot. % SiO₂. Obsah ostatních složek je asi 1 %. Do sklářské technologie patří první stupeň výroby. V kontinuální vanové peci při 1 400 °C se taví z písku a sody

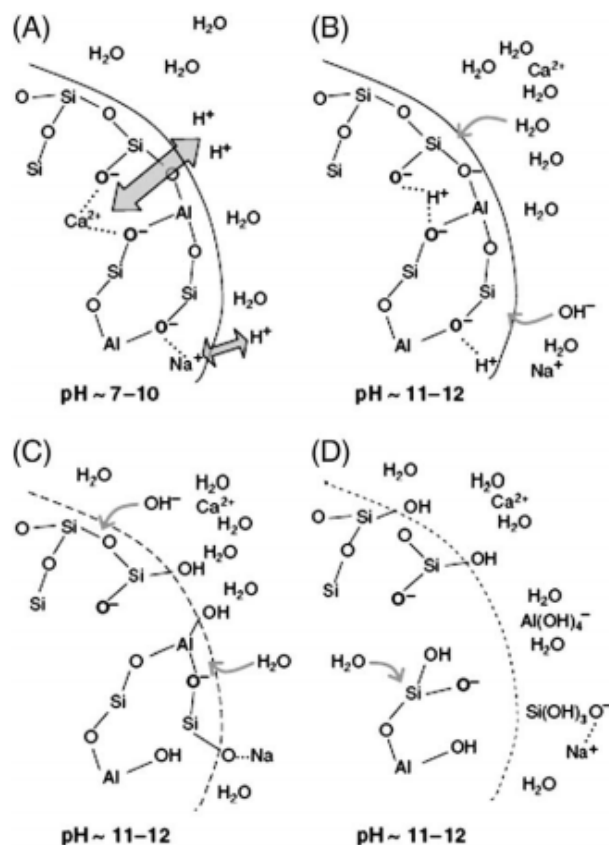
sodnokřemičité sklo. Vytékající sklovina se potom jímá do malých kokil nebo se ochlazuje vodou. Takhle vyrobené sklo je úplně průhledné, ale působením vlhkosti se na povrchu skla vytvoří bělavý povlak produktů hydrolyzy. Sodnokřemičité sklo je v určitém složení dobře rozpustné ve vodě (uvádí se rozpustnost 30 až 60 %), ale rychlost rozpouštění je malá. Pro převod do roztoku je vhodnější sklo rozdrtit a rozpouštět v autoklávu za zvýšeného tlaku a teploty. Přechodem mezi vodným roztokem a pevným sklem je tzv. -hydratované vodní sklo. Je to pevná látka, která obsahuje 10 až 30 % vody a vyznačuje se rychlým rozpouštěním ve vodě. Hydratované vodní sklo lze připravit zahříváním práškového skla s malým množstvím vody při 100 °C. Vzniká průsvitná hmota, která se snadno rozpouští už ve studené vodě. Hydratované vodní sklo se vyznačuje zvláštními reologickými vlastnostmi. Při rychle působícím napětí se chová jako hmota pružná a pevná a snese prudké nárazy bez deformace. Při dlouhodobém působení i velmi malého napětí se deformuje tokem viskózního charakteru např. již vlastní tíhou. Z reologického hlediska jde o jev příbuzný dilatanci. Z roztoku lze získat souvislé hydratované vodní sklo vypařením asi 1/2 vody. Takovýto produkt se těžko rozemílá a drtí. Hydratované vodní sklo je částečně zpevněným hydrogelem a reprezentuje přechodné stádium, které nastává při tuhnutí vodního skla jako pojivo. Nejvýznamnější měřenou vlastností kapalného vodního skla je hustota, která poskytuje informaci o konzistenci čili o složení výchozího skla [13].

2.2.3 Mechanismus alkalické aktivace vysokopecní strusky

Alkalická hydratace vysokopecní strusky je složitý proces, který se skládá z několika kroků, včetně počátečního rozpuštění vysokopecní strusky a pozdější polykondenzací reakčních produktů. Mletá granulovaná vysokopecní struska obsahuje uvnitř skelné fáze vysoké množství vápníku a nízké množství hliníku. Obrázek 2 poskytuje názorný příklad rozpouštěcího mechanismu skla obsahující jak jednomocné tak dvoumocné kationty. Hlavní rozdíl mezi Na^+ a Ca^{2+} je ten, že odstranění dvojmocného kationtu způsobí větší poškození struktury než odstranění jednomocného kationtu. Proto je vysokopecní struska lépe rozpustná v alkalickém prostředí než metakaolin, kde se Ca^{2+} nevyskytuje.

Proces začíná zničením vazeb Ca-O, Mg-O, Si-O-Si, Al-O-Al a Al-O-Si, a pak Si-Al vrstvy tvořenou na celém povrchu zrna strusky, na závěr dochází k vytvoření hydratačních produktů.

Wang a další ukázali, že v průběhu hydratace alkalicky aktivované strusky se produkty tvoří pomocí rozpouštěcího a srážecího mechanismu v průběhu počátečních stádií reakce, což může pokračovat v pozdější fázi i v pevném stavu [14].



Obrázek 2: Mechanismus rozpouštění aluminosilikátového skla během raného stadia reakce: (A) výměna H^+ iontu za Ca^{2+} a Na^+ , (B) hydrolyzáza Al-O-Si vazeb, (C) depolymerizace skelné sítě a (D) uvolnění Si a Al [14].

2.3 Plastifikátory a superplastifikátory

Superplastifikátory jsou polymerní látky a jsou to nejdůležitější chemické přísady. Jsou známé také pod pojmem přísady silně redukující vodu. Dispergují větší aglomeráty v cementové pastě na jednotlivá zrna a tímto se dosáhne zvýšení tekutosti cementové pasty.

Za posledních 30 let je použití superplastifikátorů považováno za nejdůležitější pokrok v technologii betonu. George Tucker se pokusil o první syntézy kondenzovaných naftalen-sulfát-formaldehydů. Pokus byl však neúspěšný kvůli malé molekulové hmotnosti polymerů, která způsobovala provzdušnění a následně snížení pevností [15].

Funkční vlastnosti polymerních dispergátorů závisí na molekulové hmotnosti polymerů. Z tohoto důvodu, chování superplastifikátorů je závislé na jejich molekulové hmotnosti. Polymerace zahrnují určitý stupeň náhodnosti, tudíž výsledné polymerní molekuly budou vykazovat řadu hodnot molekulových hmotností a podobně i distribuci dalších měřitelných vlastností. Tento rys může hrát důležitou roli při určování chování superplastifikátoru [16].

Superplastifikátory mají daleko větší význam oproti ostatním chemickým přísadám díky jejich široké škále použití. Mohou se používat jako přísady redukující spotřebu vody při zachování stejné zpracovatelnosti. Snížením vodního součinitele se dosáhne lepších vlastností výsledného betonu, konkrétně zvýšení trvanlivosti a pevnosti. Další možností použití superplastifikátoru je snížení obsahu cementu i vody. V takovém případě je zpracovatelnost i pevnost superplastifikovaného betonu stejná jako u srovnávacího betonu. Pokud se sníží obsah cementu v betonu, sníží se i vývin hydratačního tepla. Dalším pozitivním přínosem je

snížení smrštění, díky vyššímu podílu kameniva k cementu. Třetí způsob použití superplastifikátoru je použití bez snížení obsahu cementu a vody, čímž lze dosáhnout lepší zpracovatelnosti. Tento způsob se používá u betonáží s hustou výztuží, které vyžadují vysoce zpracovatelnou směs [15].

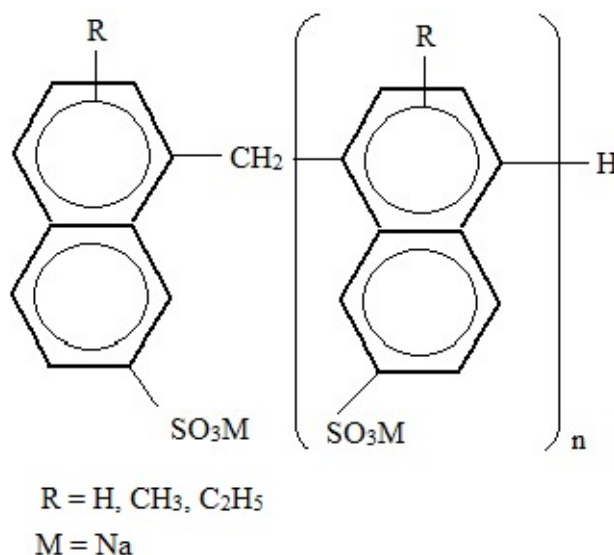
2.3.1 Základní typy superplastifikátorů

V současné době se používají čtyři základní typy superplastifikátorů [9]:

1. Naftalenové superplastifikátory – sulfonované soli polykondenzátu naftalenu a formaldehydu
2. Melaminové superplastifikátory – sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu
3. Lignosulfonátové superplastifikátory – s nízkým obsahem sacharidů
4. Polyakryláty (polykarboxyláty)

2.3.1.1 Naftalenové superplastifikátory

Naftalenové superplastifikátory jsou nejrozšířenější a nejúčinnější ze skupiny sulfonátů a nevykazují žádný retardační účinek. Jedná se o kondenzační produkt formaldehydu a kyseliny β -naftalensulfonové [16, 17].

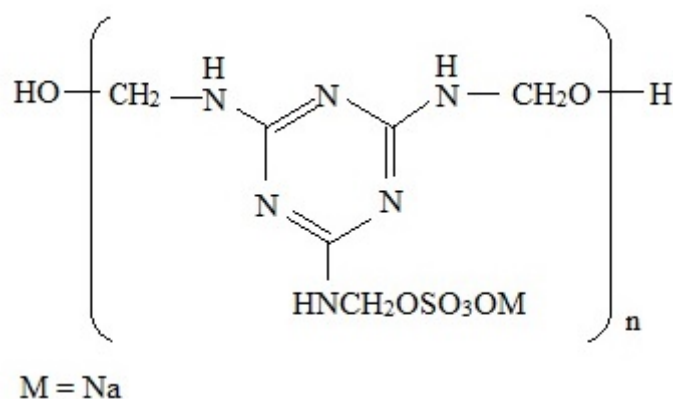


Obrázek 3: Molekula naftalenového superplastifikátoru [18]

Polynaftalen sulfonát byl první typ syntetického superplastifikátoru redukující vodu, který byl zaveden v betonu. Výroba naftalenového superplastifikátoru je docela náročná a výsledný účinek závisí na dosažení optimálního kondenzačního stupně, který vyjadřuje počet naftalensulfonových jednotek v molekule superplastifikátoru. Pokud je dodržena správnost technologického procesu výroby a čistota vstupních surovin tak je nepatrný provzdušňovací účinek. Tyto sloučeniny jsou používány jako superplastifikátory s velkou spolehlivostí ve stavebnictví doma i v zahraničí [16, 17].

2.3.1.2 Melaminové superplastifikátory

Druhá skupina na bázi sulfonovaných melaminformaldehydových pryskyřic je také široce užívána v betonovém průmyslu. Typická molekulární struktura:

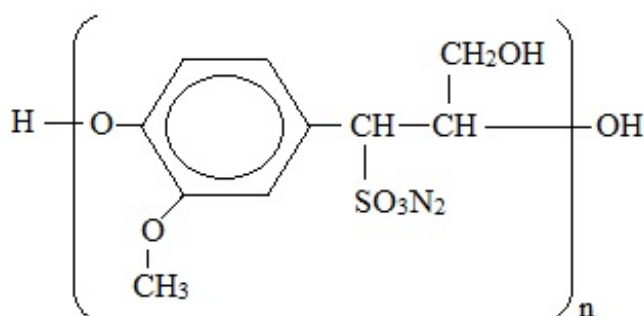


Obrázek 4: Molekula melaminového superplastifikátoru [18]

Tato plastifikační přísada nevykazuje žádný vedlejší provzdušňovací účinek a retardační účinek je také minimální. Jejich nesporná výhoda je v tom, že nejsou citlivé na předávkování [17].

2.3.1.3 Lignosulfonátové plastifikátory

Tyto přísady se ve velkém množství dlouhodobě využívají. Mají dobrou účinnost i při malých dávkách a jsou náročné na předávkování. Jejich poměrně nízká cena je díky nenáročné výrobě. Tyto plastifikační přísady se vyrábí z odpadu při zpracování dřeva v papírenském průmyslu, a aby mohly být použity v betonu, vyžadují pouze jednoduchou úpravu. Použitím lignosulfonátů je možné snížit množství vody o 5 až 10 %, aniž by bylo třeba se obávat vedlejších účinků (například: ve dřevě jsou obsáhnuta povrchově aktivní činidla, které mohou zachycovat vzduchové bubliny nebo může dojít k retardaci způsobenou sacharidy). Proto je možné lignosulfonáty dále upravovat a odstranit z nich povrchově aktivní činidla a více sacharidů, ale tím se výsledný produkt prodražuje [9, 17].



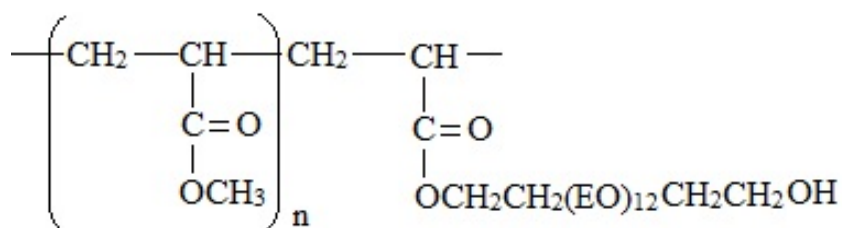
Obrázek 5: Molekula lignosulfonátového plastifikátoru [18]

2.3.1.4 Polyakryláty (polykarboxyláty)

Syntetické organické polymery nesoucí karboxylové skupiny mohou také sloužit jako vysoce efektivní dispergační činidla. Ve skutečnosti polykarboxyláty jsou široce používány jako dispergační činidla v čisticích prostředcích. Karboxylová skupina je slabší než sulfonová skupina. Polykarboxyláty jsou ionizovány pouze v alkalickém prostředí, zatímco polysulfonáty jsou vysoce ionizovány dokonce i v mírně kyselém prostředí [16].

Díky polykarboxylátových látek se oproti ostatním plastifikátorům výrazně snižuje množství záměsové vody a dochází k zvýšení počátečních i koncových pevností betonu.

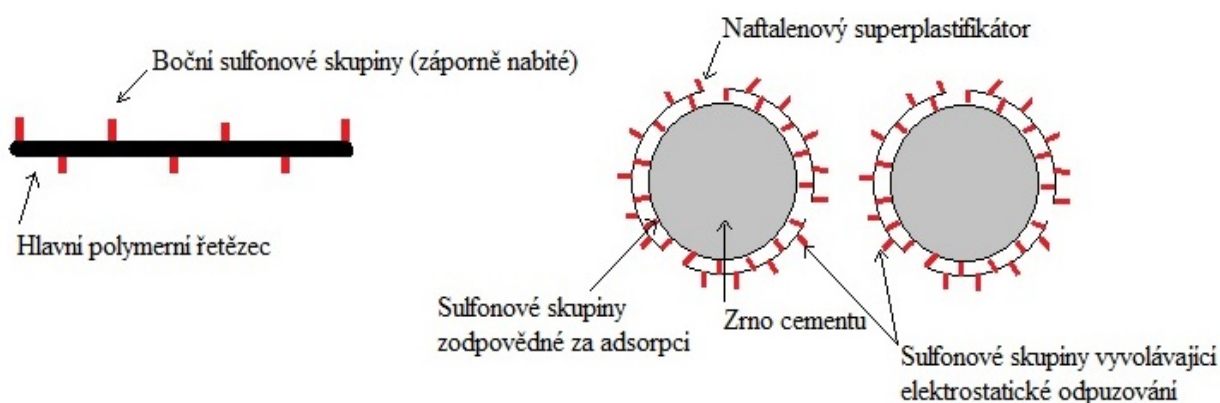
Prodlužuje se doba zpracovatelnosti a zvyšuje se odolnost proti průsakům. U těchto přísad je nutné dbát na striktní dávkování, protože polykarboxyláty jsou náchylné k předávkování [17].



Obrázek 6: Molekula akrylátového superplastifikátoru [18]

2.3.2 Mechanismus působení superplastifikátorů

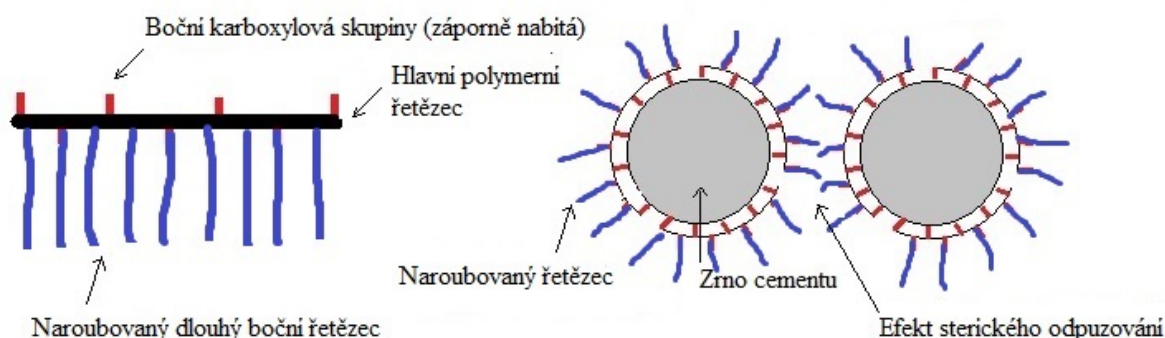
Dispergační účinek byl v minulých letech přisuzován pouze stejnému elektrostatickému náboji, který se vytvářel na cementových částicích. Mezi cementovými částicemi existují přitažlivé elektrostatické síly, které způsobují aglomeraci. Tyto síly jsou pomocí SO_3^- skupin neutralizovány tak, že se na povrch cementového zrna naadsorbuje naftalenový nebo melaminový superplastifikátor. Na druhém konci hlavního polymerního řetězce jsou vytvořeny negativně nabitě skupiny (SO_3^-), díky kterým dochází k elektrickému odpuzování cementových částic a jejich disperzi.



Obrázek 7: Schematické znázornění naftalenového superplastifikátoru [15]

Po adsorpci naftalenového superplastifikátoru bylo elektrické odpuzování sledováno pomocí měření zeta-potenciálu. Další experimentální výsledky měření zeta-potenciálu pro akrylové polymery nepotvrdili stejné superplastifikační chování. A proto superplastifikátory na bázi polykarboxylátu vytvářejí ve vodní fázi cementových částic nepatrné změny zeta-potenciálu, na rozdíl od naftalenového superplastifikátoru. Tyto výsledky naznačují, že dispergace cementových částic, po přidání superplastifikátoru, není způsobena pouze elektrostatickým odpuzováním. Alespoň v případě polykarboxylátové příměsi je za dispergaci cementových částic zodpovědná samotná adsorpce superplastifikátoru, než elektrostatické odpuzování. Disperze cementových částic po přidavku polykarboxylátového superplastifikátoru je spíše díky sterickému odpuzování (díky přítomnosti dlouhých bočních řetězců neutrálně nabitých) než přítomnost COO^- skupin, díky kterým dochází k adsorpci superplastifikátoru na povrch cementových zrn. Naroubované řetězce na hlavním řetězci, který je naadsorbovaný na

povrchu cementových zrn, způsobují odtlačování jednotlivých částic a nedochází tak k aglomeraci [15].



Obrázek 8: Schematické znázornění polykarboxylátového superplastifikátoru [15]

2.3.3 Superplastifikátory v alkalicky aktivovaných systémech

První pokusy o alkalické pojivo, ve kterém byla použita příměs redukující vodu, v tomto případě lignosulfonát, byly zkoušeny ve Finsku roku 1983. Nicméně, studie nevedly v tomto ohledu k objasnění chování těchto příměsí v alkalických systémech. Douglas a Brandštetr také došli k závěru, že superplastifikátory na bázi lignosulfonátu a naftalen sulfonátu nebyli efektivní v alkalicky aktivované strusce [19, 20]. Wang a další také poznamenali, že příměsí na bázi lignosulfonátu snižují pevnost v tlaku bez zlepšení zpracovatelnosti [21].

Bakharev a další naopak zjistili, že plastifikátory na bázi lignosulfonátu se chovají ve vysokopecní strusce aktivovanou vodním sklem nebo NaOH a Na_2CO_3 podobně jako v portlandském cementu. Tyto příměsí zvyšují zpracovatelnost, ale zpomalují tuhnutí a vývoj mechanických pevností. Naopak nepatrně snižují smrštění. Plastifikátory na bázi naftalenu zvyšují zpracovatelnost vysokopecní strusky aktivovanou vodním sklem nebo NaOH a Na_2CO_3 v prvních pár minutách, ale poté vyvolávají rychlé tuhnutí. Tyto příměsí snižují v pozdější době mechanickou pevnost a zvyšují smrštění. Několik významných autorů vyvodilo, že jejich použití v alkalicky aktivované strusce je nevhodné [22].

Collins a Sanjayan studovali vliv glukonátu vápenatého a sodného jako příměs redukující vodu v maltách a betonech z vysokopecní strusky aktivovanou směsí NaOH a Na_2CO_3 . V tomto případě byla zpracovatelnost malty zlepšena. Bohužel příměs snížila jednodenní pevnost, a to zejména s jejím vyšším přídávkem [23].

Puertas s další studovali vliv superplastifikátorů na bázi vinylového kopolymeru a polykarboxylátu na maltu a pojivo z vysokopecní strusky a popílku aktivovaného vodním sklem. Tito autoři vyvodili, že příměs v množství 2 % na bázi vinylového kopolymeru v maltě z aktivované vysokopecní strusky snížila mechanickou pevnost po 2 a 28 dnech, nezlepšila tekutost pojiva a zpomalila aktivační proces. Naopak příměs na bázi polykarboxylátu neměla žádný vliv na mechanickou pevnost nebo aktivační mechanismus, i když zlepšila tekutost pojiva. Jejich studie také ukázaly, že povaha superplastifikátorů měla viditelný vliv na proces aktivace a chování alkalicky aktivované strusky, přičemž tyto účinky byly mnohem méně intenzivní v alkalicky aktivovaném popílku [19].

Palacios a další studovali interakce několika superplastifikátorů s alkalicky aktivovanou struskou a ukázali, že adsorpce příměsí na bázi melaminu, naftalenu a vinylového kopolymeru na alkalicky aktivovanou strusku byla 3 až 10 krát nižší než na portlandský cement. Částečné vysvětlení adsorpčního chování těchto dvou pojiv byl mírně záporný zeta potenciál pro suspenzi alkalicky aktivované strusky s pH 11,7 (přibližně -2 mV) než u suspenze portlandského cementu (přibližně $+0,5$ mV).

Tito autoři také zjistili vliv příměsí na reologické vlastnosti alkalicky aktivované strusky přímo závislý na typu a dávkování superplastifikátorů a také na pH roztoku alkalického aktivátoru. Pouze u příměsí na bázi naftalenu bylo pozorováno snížení reologických vlastností alkalicky aktivované strusky při pH 13,6. Bylo pozorováno, že přídavek nižší než 1,26 mg naftalenu ku 1 g vysokopeční strusky vyvolá 98% redukci napětí na mezi kluzu. Nicméně, žádný ze superplastifikátorů nezlepšil tekutost, při použití vodního skla jako aktivátor [24-26].

Palacios a Puertas studovali chemickou stabilitu superplastifikátorů (na bázi melaminu, naftalenu, vinylového kopolymeru a polykarboxylátu) ve vysoce alkalickém prostředí a došli k závěru, že všechny kromě naftalenového superplastifikátoru v alkalickém prostředí byly chemicky nestabilní při $\text{pH} > 13$. Při takto vysokých hodnotách podlely příměsí na bázi vinylového kopolymeru a polykarboxylátu alkalické hydrolýze, což vedlo ke změně jejich struktury [19].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité materiály

Granulovaná vysokopecní struska SMŠ 400, KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r. o,

Vodní sklo o modulu 2,0

Písek ČSN jemný, střední, hrubý

Superplastifikátory na bázi polynaftalenu
 na bázi polymelaminů
 na bázi modifikovaných polykarboxylátů
 na bázi modifikovaných polyfosfonátů
 na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu
 na bázi lignosulfonátu
 na bázi modifikovaných naftalenů
 na bázi polykarboxylátu

Destilovaná voda

3.2 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

3.2.1 Příprava vzorků

Postup přípravy jednotlivých vzorků alkalicky aktivované strusky byl totožný, pouze se měnil typ superplastifikátoru a jeho množství. Superplastifikátory byly dávkovány podle doporučeného množství, které bylo uvedeno v technickém listu. Dávkování bylo přepočítáno na vysokopecní strusku. V laboratorní míchačce bylo zhomogenizováno 7,1 hm. % vodního skla; 7,6 hm.% destilované vody; 28,5 hm. % vysokopecní strusky; 19,0 hm. % jemného písku; 19,0 hm. % středního písku; 19,0 hm. % hrubého písku a různý typ superplastifikátoru v různém množství. Směs byla míchána tři minuty. Část směsi byla použita na měření konzistence, která byla měřena na základě normy ČSN EN 1015-3. Druhá část byla nalita do forem o rozměrech 20 × 20 × 100 mm. Tyto trámečky byly ponechány 24 hodin při laboratorní teplotě. Po 24 hodinách byly trámečky odformovány a ponechány zrát při laboratorní teplotě ve vlhkostní komoře (RH = 99 %).

3.2.2 Stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu byly stanoveny pomocí přístroje DESTTEST 3310. Pevnost v tlaku byla měřena na lisu BS 300 a pevnost v tahu za ohybu na lamačce BS 10. Trámečky byly testovány po 1, 7, 28 dnech zrání na základě normy ČSN EN 196-1. Hodnoty naměřených pevností jsou udávány v MPa.

Hodnoty pevností v tlaku uvedené v příslušných tabulkách jsou průměrnou hodnotou minimálně tří naměřených hodnot. Hodnoty pevností v tahu za ohybu uvedené v příslušných tabulkách jsou vždy průměrnou hodnotou dvou naměřených hodnot.

3.3 Infračervená spektrometrie superplastifikátorů

Infračervená spektrometrie slouží ke strukturní charakterizaci a k identifikaci organických sloučenin. Principem techniky je absorpce infračerveného záření molekulami látek. Nejdůležitější oblast je 4 000 až 400 cm^{-1} . Energie infračerveného záření nestačí na změny

elektronových stavů, ale způsobuje pouze změny vibračních a rotačních stavů molekul.

Infračervené spektrum je závislost absorpce nebo transmitance na vlnočtu absorbovaného záření. Spektrum je pásové a pásy ve spektru odpovídají různým typům vibračních přechodů. Absorbovat se může jen záření, jehož energie odpovídá příslušným vibračním a rotačním přechodům [27, 28].

Z pohledu kvalitativní analýzy lze infračervená spektra rozdělit na dvě části:

1. oblast charakteristických vibrací ($4\ 000$ až $1\ 300\ \text{cm}^{-1}$) – pásy v této oblasti charakterizují jednotlivé funkční skupiny (CH_3 , CH_2 , OH , CHO atd.)
2. oblast „otisku palce“ ($1\ 300$ až $400\ \text{cm}^{-1}$) – pásy v této oblasti převažují vibrace ovlivněné charakterem celého skeletu analyzované molekuly a srovnáním spektry v knihovně spekter, lze látku identifikovat [29].

3.3.1 Příprava a měření vzorků

Vzorky byly připraveny do lahviček tak, že jedna lahvička obsahovala samotný superplastifikátor a druhá lahvička obsahovala superplastifikátor s vodním sklem v poměru 1 : 1.

Všechny vzorky byly měřeny diferenční metodou Nicolet iS50 FTIR spektrometrem pomocí ATR nástavce. Spektrometr byl nastaven na 64 skenů a rozlišení $4\ \text{cm}^{-1}$.

4. VÝSLEDKY A DISKUSE

V této kapitole se popisuje vliv různých druhů superplastifikátorů na pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a na rozliv. Dále je pomocí infračervené spektrometrie vyhodnoceno chování vybraných superplastifikátorů ve vodním skle.

4.1 Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a rozliv

4.1.1 Alkalicky aktivovaná struska bez přídavku superplastifikátoru

Tabulka č. 2: Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu

	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu za ohybu
1. den	11,1	3,4
7. den	83,1	8,7
28. den	100,2	13,3

4.1.2 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi polynaftalenu

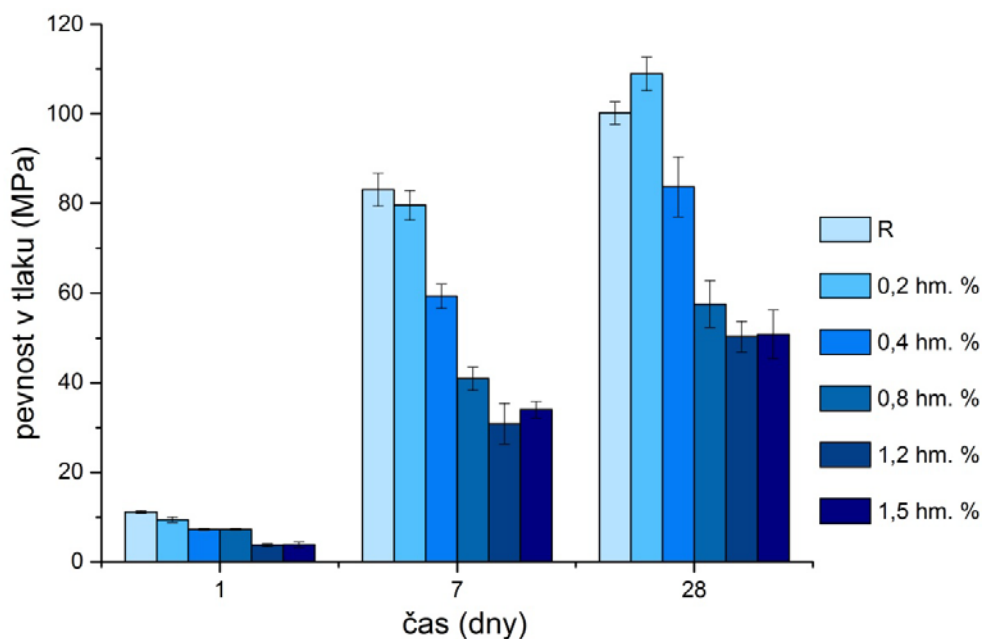
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,4 – 1,5 % z hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 0,8 % hmotnosti cementu [30].

Tabulka č. 3: Pevnost v tlaku

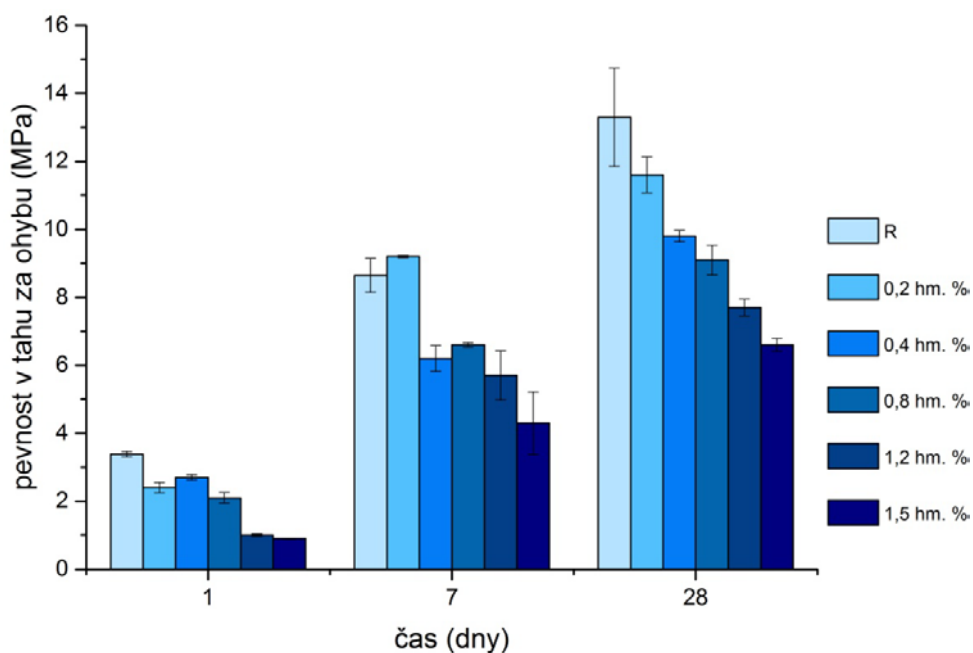
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,2	9,4	79,6	109,0
0,4	7,2	59,3	83,7
0,8	7,2	40,9	57,5
1,2	3,7	30,8	50,3
1,5	3,8	34,0	50,8

Tabulka č. 4: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,2	2,4	9,2	11,6
0,4	2,7	6,2	9,8
0,8	2,1	6,6	9,1
1,2	1,0	5,7	7,7
1,5	0,9	4,3	6,6



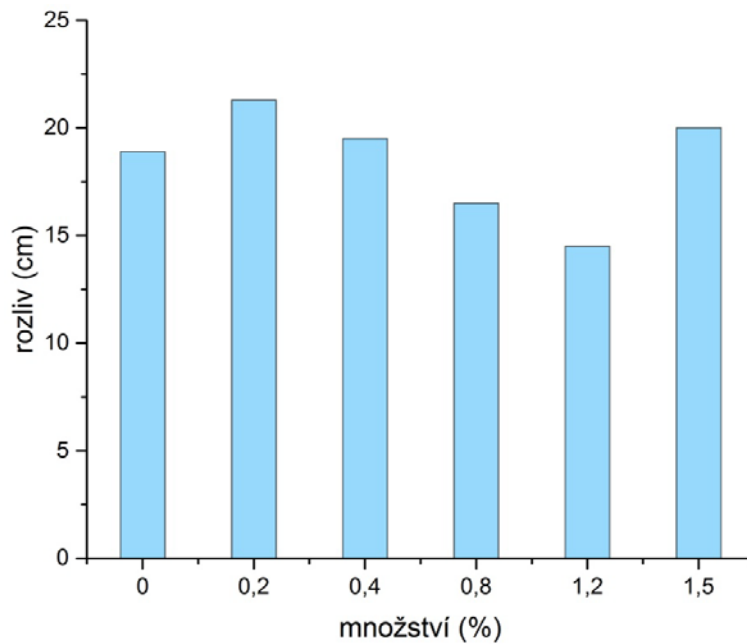
Obrázek 9: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polynaftalenu



Obrázek 10: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polynaftalenu

Tabulka 5: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,2	21,3
0,4	19,5
0,8	16,5
1,2	14,5
1,5	20,0



Obrázek 11: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přídavicích superplastifikátoru na bázi polynaftalenu

Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu vzrůstá po 7 a 28 dnech zrání, ale se zvyšujícím množstvím se snižuje. Největší pevnosti v tlaku alkalicky aktivované strusky dosahuje přídavek 0,2 hm. % superplastifikátoru po 28 dnech zrání.

Zpracovatelnost se po přidavku superplastifikátoru naftalenového typu zlepšila oproti referenčnímu vzorku, ale se zvyšujícím množstvím klesala. Od přídavku 1,5 hm. % opět zpracovatelnost vzrostla, což už nebyl vliv superplastifikátoru, ale došlo ke zředění směsi.

4.1.3 Vliv přídavku superplastifikátoru na bázi polymelaminů

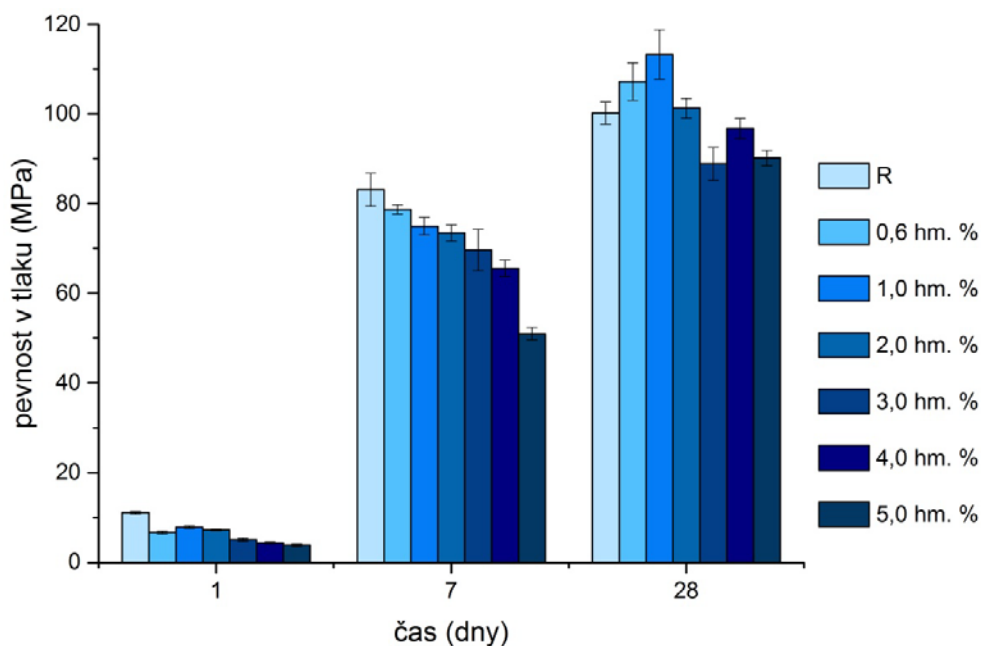
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,6 – 5,0 % hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 1,0 % hmotnosti cementu [31].

Tabulka č. 6: Pevnost v tlaku

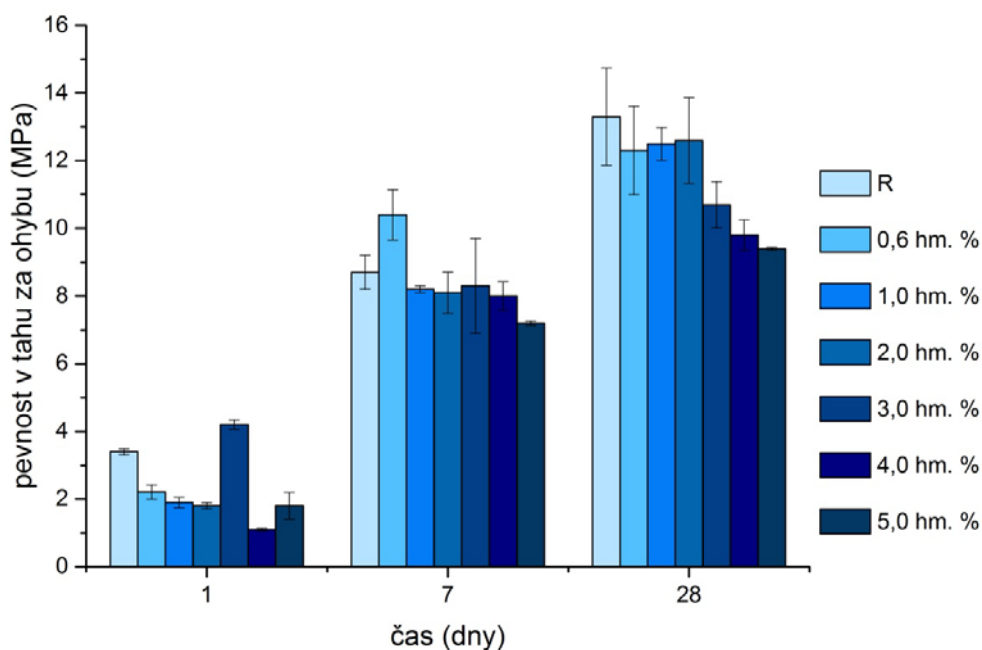
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,6	6,7	78,7	104,3
1,0	7,9	75,0	113,3
2,0	7,3	73,5	101,3
3,0	5,1	66,5	85,1
4,0	4,4	65,6	96,8
5,0	3,9	51,0	90,2

Tabulka č. 7: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,6	2,2	10,4	12,3
1,0	1,9	8,2	12,5
2,0	1,8	8,1	12,6
3,0	4,2	8,3	10,7
4,0	1,1	8,0	9,8
5,0	1,8	7,2	9,4



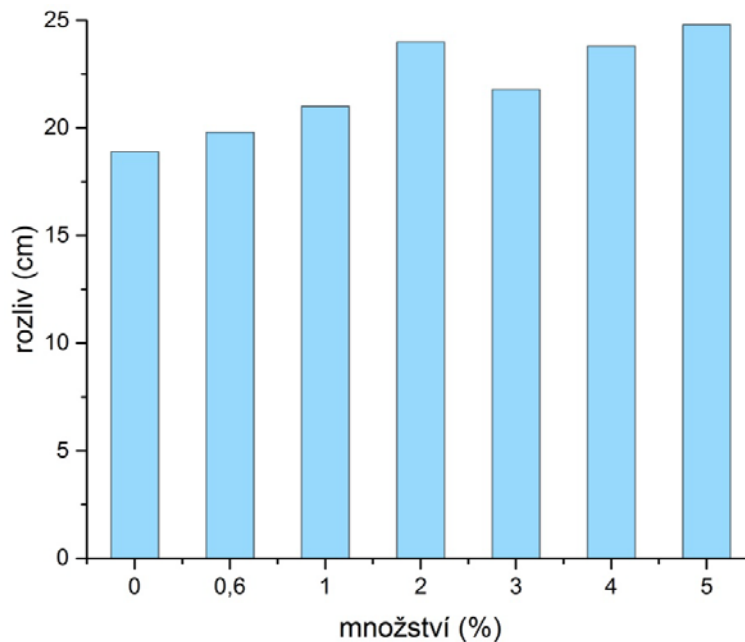
Obrázek 12: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polymelaminů



Obrázek 13: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polymelaminů

Tabulka 8: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,6	19,8
1,0	21,0
2,0	24,0
3,0	21,8
4,0	23,8
5,0	24,8



Tabulka 14: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přídavicích superplastifikátoru na bázi polymelaminů

Pevnost v tlaku po 7 dnech zrání vzrostla, ale se zvyšujícím přídatkem superplastifikátoru klesla. Po 28 dnech se pevnost v tlaku oproti referenčnímu vzorku zvyšovala se zvyšujícím přídatkem plastifikátoru, ale od přídatku 2,0 hm. % začala klesat.

Přídatek 3,0 hm. % má pevnost v tahu za ohybu po prvním dni zrání výrazně vyšší oproti ostatním a je i vyšší než referenční vzorek. Po 7 dnech zrání má nejvyšší pevnost v tahu za ohybu přídatek 0,6 hm. % a opět je vyšší než referenční vzorek. Po 28 dnech jsou pevnosti s přídatky do 2,0 hm. % přibližně stejné, ale s přibývajícím množstvím klesá.

Zpracovatelnost se vlivem superplastifikátoru zlepšila a se zvyšujícím množstvím se dále zlepšovala. S přídatkem 3 hm. % se zpracovatelnost zhoršila, ale s dalšími přídatky se začala opět zlepšovat, což už bylo způsobeno předávkováním směsi.

4.1.4 Vliv přídatku superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů

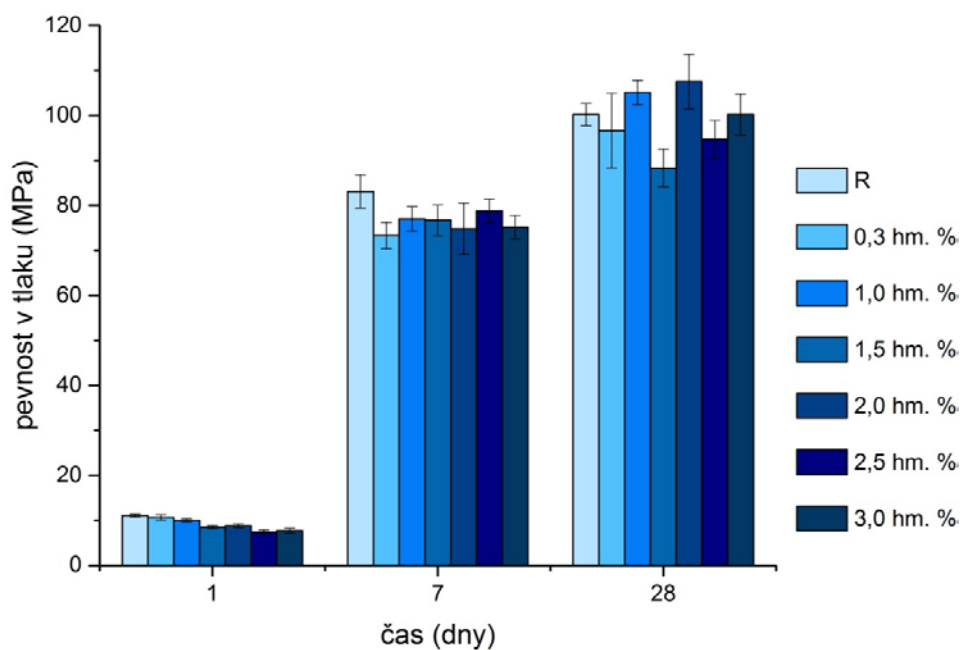
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,3 – 3,0 % hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 1,0 % hmotnosti cementu [32].

Tabulka č. 9: Pevnost v tlaku

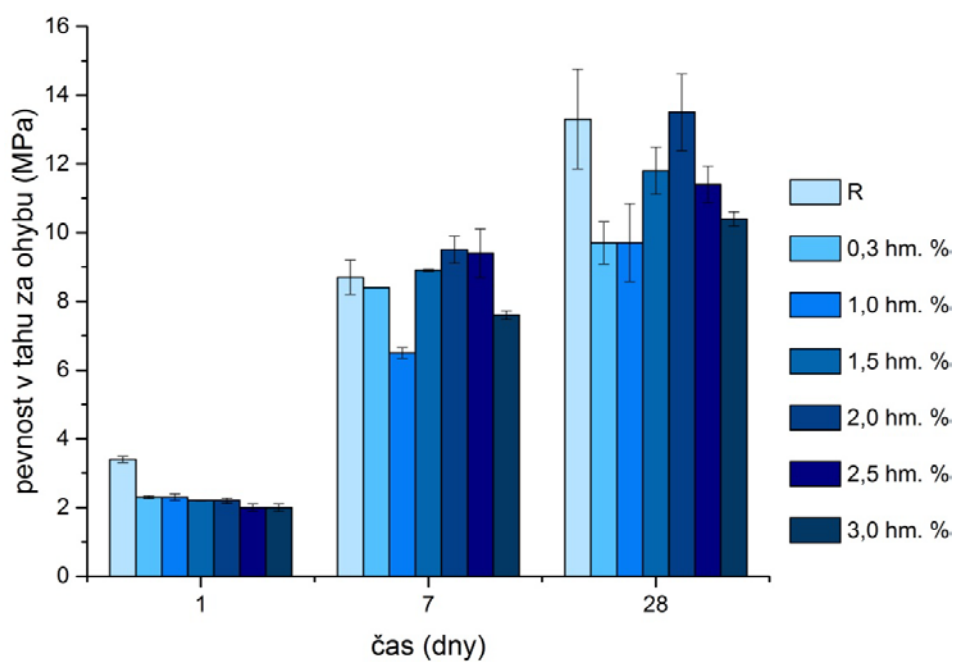
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	10,7	73,3	96,6
1,0	10,0	77,0	105,1
1,5	8,5	76,7	85,8
2,0	8,8	71,0	107,5
2,5	7,4	78,8	94,7
3,0	7,7	75,2	100,2

Tabulka č. 10: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	2,3	8,4	9,7
1,0	2,3	6,5	9,7
1,5	2,2	8,9	11,8
2,0	2,2	9,5	13,5
2,5	2,0	9,4	11,4
3,0	2,0	7,6	10,4



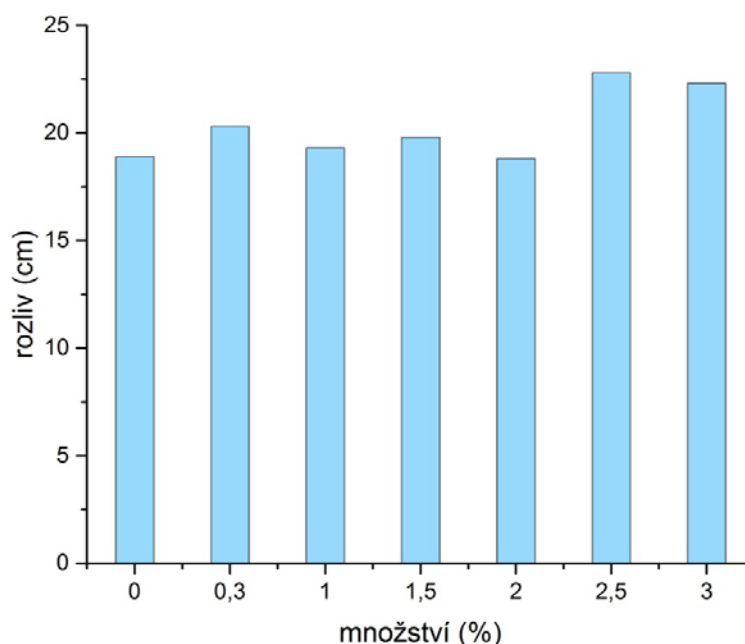
Obrázek 15: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů



Obrázek 16: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů

Tabulka 11: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,3	20,3
1,0	19,3
1,5	19,8
2,0	18,8
2,5	22,8
3,0	22,3



Obrázek 17: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přídavicích superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů

Přídavek superplastifikátoru polykarboxylátového typu má po 1 a 7 dnech zrání negativní vliv na pevnost v tlaku. Po 28 dnech zrání se vlivem přídavek 1,0 a 2,0 hm. % superplastifikátoru pevnost v tlaku zvýšila. Pevnost v tahu za ohybu se vlivem superplastifikátoru nezlepšila

Superplastifikátor na bázi modifikovaných polykarboxylátů nemá vliv na zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované strusky. Od Přídávku 2,5 hm. % se začala zpracovatelnost zlepšovat, což bylo způsobeno zředěním a předávkováním směsí.

4.1.5 Vliv přídávku superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů

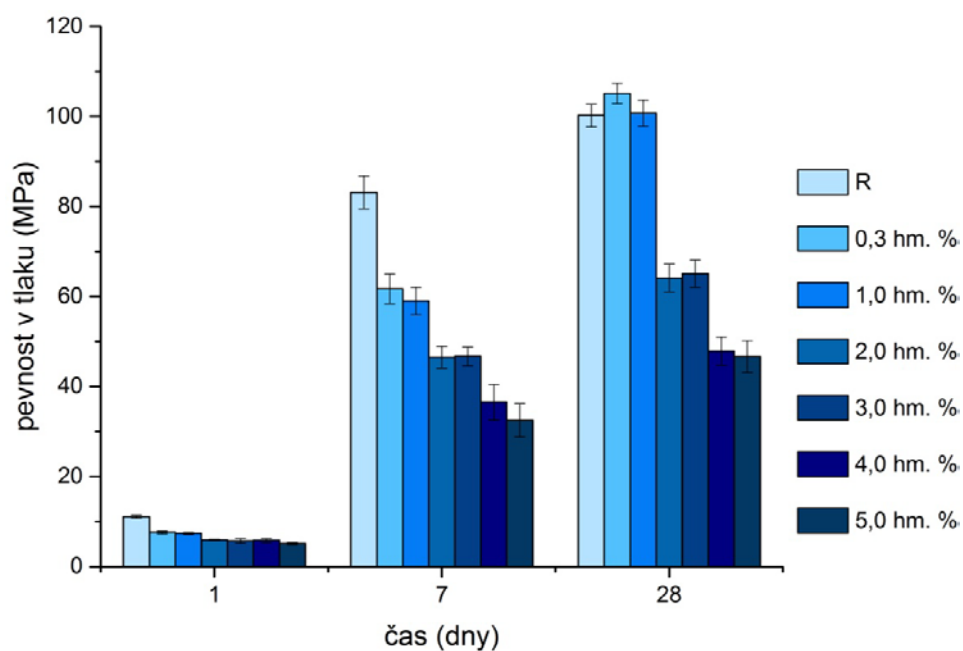
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,3 – 5,0 % hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 1,0 % hmotnosti cementu [33].

Tabulka č. 12: Pevnost v tlaku

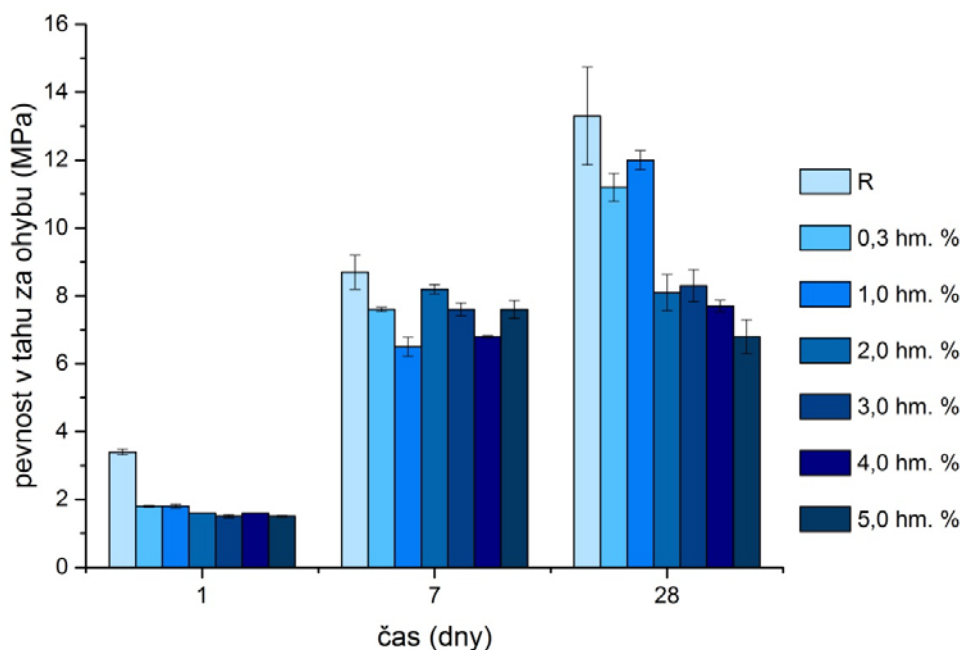
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	7,6	64,0	105,1
1,0	7,4	59,0	100,7
2,0	5,9	46,5	64,1
3,0	5,7	46,7	65,1
4,0	5,8	34,7	50,9
5,0	5,1	30,9	44,6

Tabulka č. 13: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	1,8	7,6	11,2
1,0	1,8	6,5	12,0
2,0	1,6	8,2	8,1
3,0	1,5	7,6	8,3
4,0	1,6	6,8	7,7
5,0	1,5	7,6	6,8



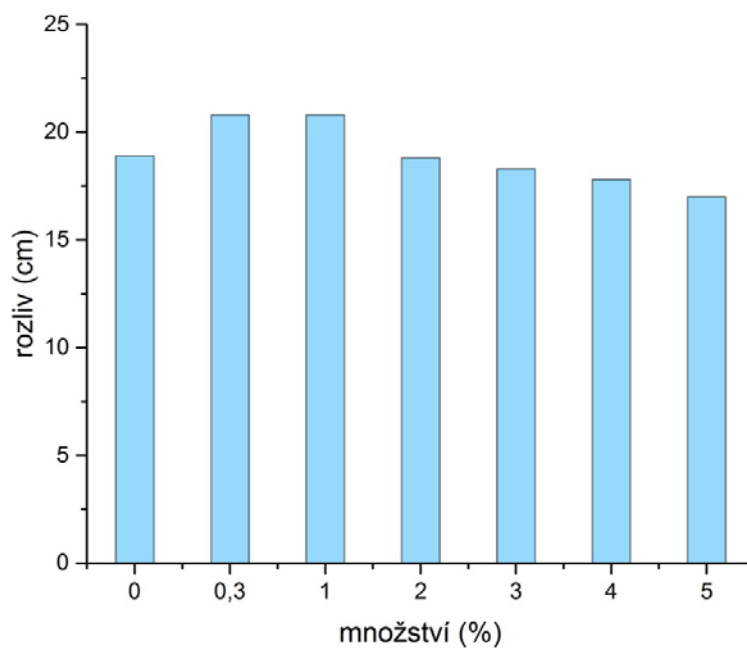
Obrázek 18: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů



Obrázek 19: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů

Tabulka 14: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,3	20,8
1,0	20,8
2,0	18,8
3,0	18,3
4,0	17,8
5,0	17,0



Obrázek 20: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přidavcích superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů

Vlivem superplastifikátoru na bázi polyfosfonátu se pevnost v tlaku i pevnost v tahu za ohybu se zvyšujícím množstvím snižuje.

S přidavky 0,3 a 1,0 hm. % superplastifikátoru se zpracovatelnost oproti referenčnímu vzorku zlepšila. Se zvyšujícím přídatkem se začala zhoršovat.

4.1.6 Vliv přídatku superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu

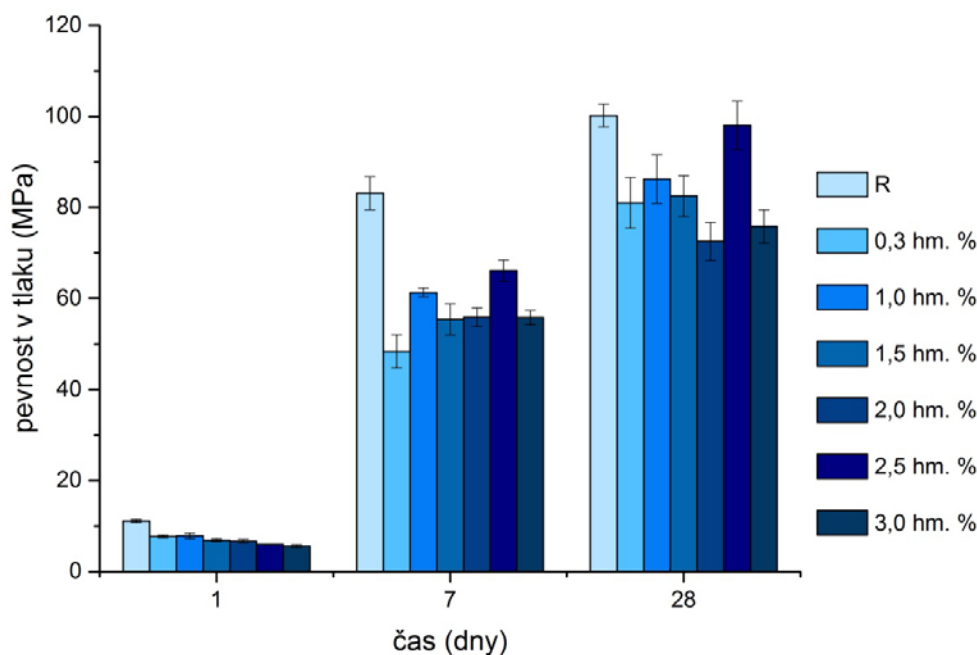
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,3 – 3,0 % hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 1,0 % hmotnosti cementu [34].

Tabulka č. 15: Pevnost v tlaku

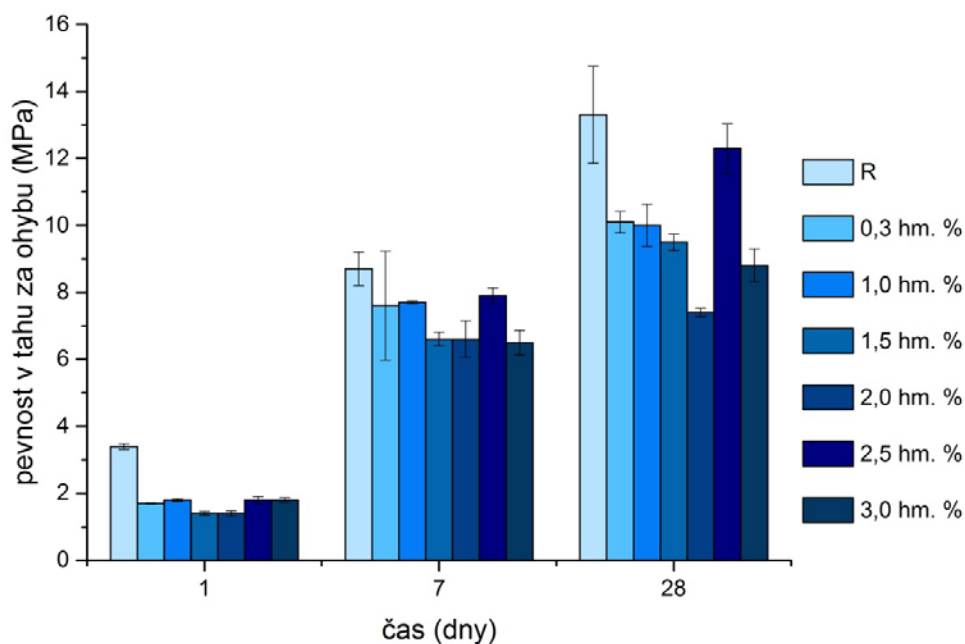
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	7,7	52,3	78,5
1,0	7,8	61,3	86,2
1,5	6,9	55,4	82,5
2,0	6,7	55,9	72,5
2,5	6,0	66,1	98,0
3,0	5,6	55,8	75,8

Tabulka č. 16: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	1,7	7,6	10,1
1,0	1,8	7,7	10,0
1,5	1,4	6,6	9,5
2,0	1,4	6,6	7,4
2,5	1,8	7,9	12,3
3,0	1,8	6,5	8,8



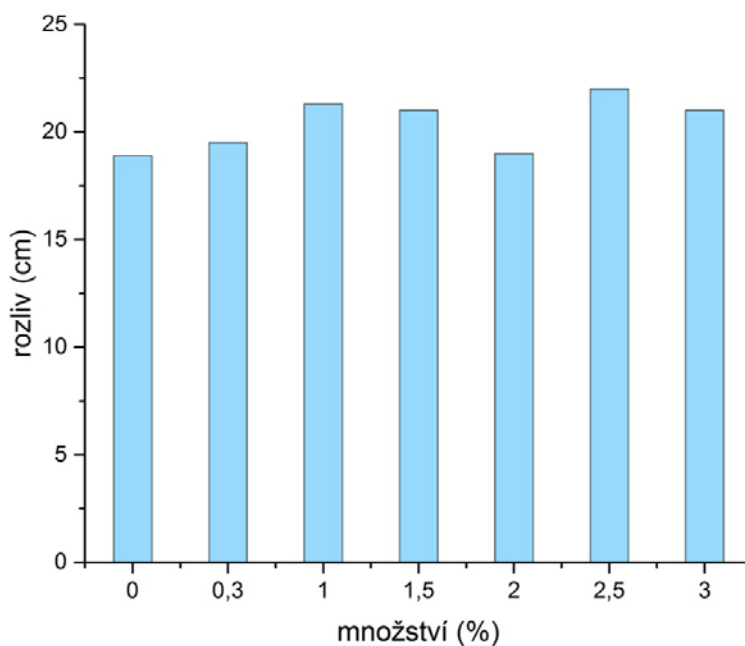
Obrázek 21: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu



Obrázek 22: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu

Tabulka 17: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,3	19,5
1,0	21,3
1,5	21,0
2,0	19,0
2,5	22,0
3,0	21,0



Obrázek 23: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přidavcích superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu

Pevnost v tlaku ani pevnost v tahu za ohybu se vlivem superplastifikátoru nezvětšila, naopak je o hodně nižší než pevnost referenčního vzorku. Výjimkou je přídavek superplastifikátoru o množství 2,5 hm. %, který má pevnost v tlaku po 28 dnech zrání stejnou jako referenční vzorek.

Zpracovatelnost se vlivem superplastifikátoru zlepšila a se zvyšujícím množstvím se dále zlepšovala. S přídavkem 2,0 hm. % se zpracovatelnost zhoršila, ale s dalšími přídavky se začala opět zlepšovat, což už bylo způsobeno zředěním a předávkováním směsi.

4.1.7 Vliv přídavku plastifikátoru na bázi lignosulfonátu

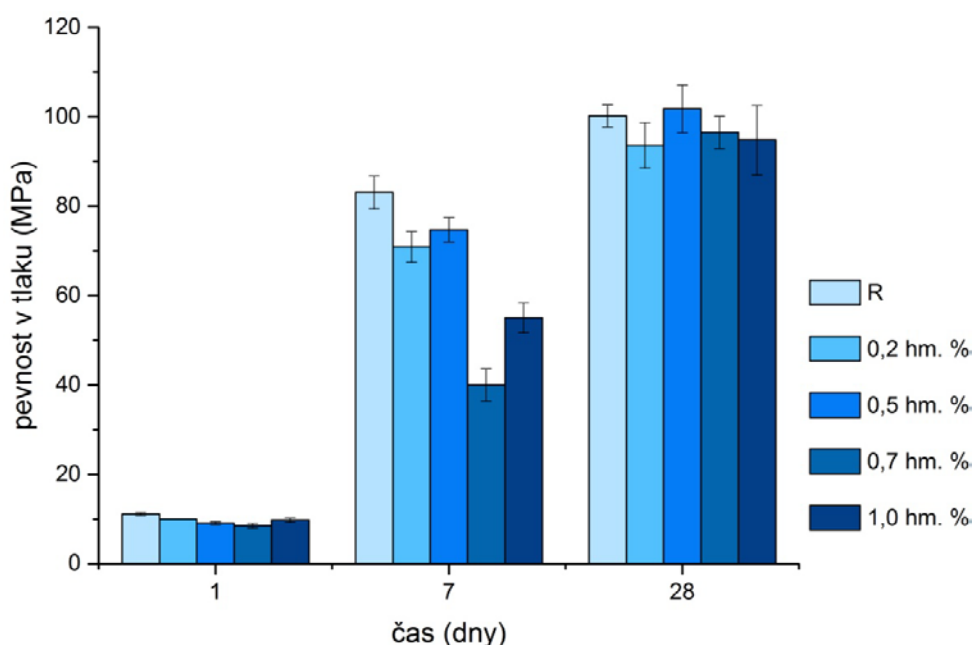
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,2 – 1,0 % hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 0,5 % hmotnosti cementu [35].

Tabulka č. 18: Pevnost v tlaku

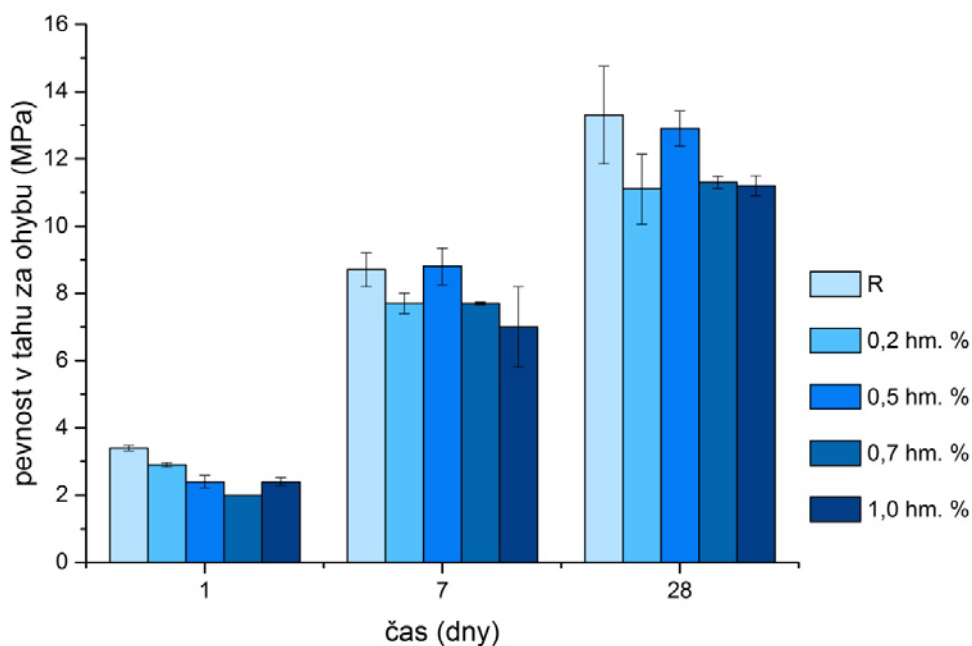
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,2	10,0	70,9	93,6
0,5	9,1	71,9	101,8
0,7	8,5	60,0	96,5
1,0	9,8	55,0	91,2

Tabulka č. 19: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,2	2,9	7,7	11,1
0,5	2,4	8,8	12,9
0,7	2,0	7,7	11,3
1,0	2,4	7,0	11,2



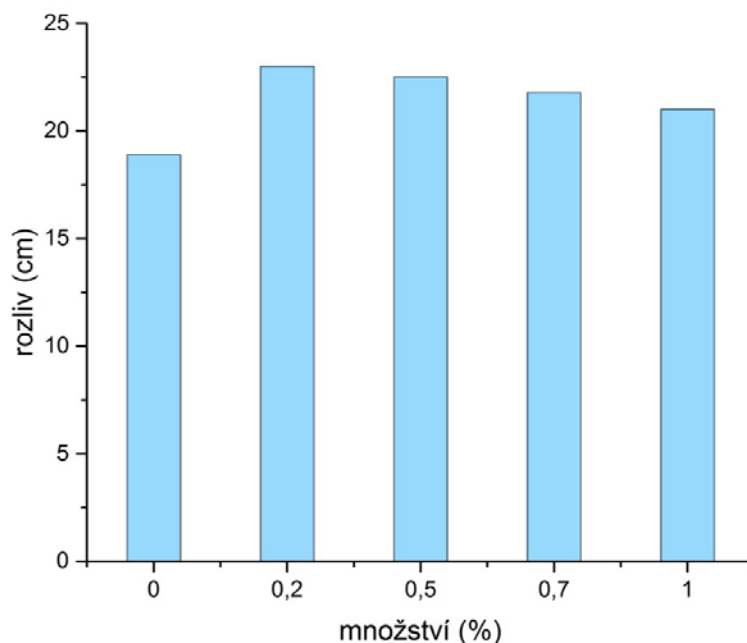
Obrázek 24: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přídavkem plastifikátoru na bázi lignosulfonátu



Obrázek 25: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem plastifikátoru na bázi lignosulfonátu

Tabulka 20: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,2	23,0
0,5	22,5
0,7	21,8
1,0	21,0



Obrázek 26: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přidavcích plastifikátoru na bázi lignosulfonátu

Pevnost v tlaku i pevnost v tahu za ohybu se vlivem plastifikátoru lignosulfonátového typu po celou dobu zrání nezlepšila oproti referenčnímu vzorku.

Zpracovatelnost se s přidavkem 0,2 hm. % plastifikátoru výrazně zlepšila, ale se zvětšujícím přidavkem začala nepatrně klesat.

4.1.8 Vliv přidavku superplastifikátoru na bázi modifikovaných naftalenů

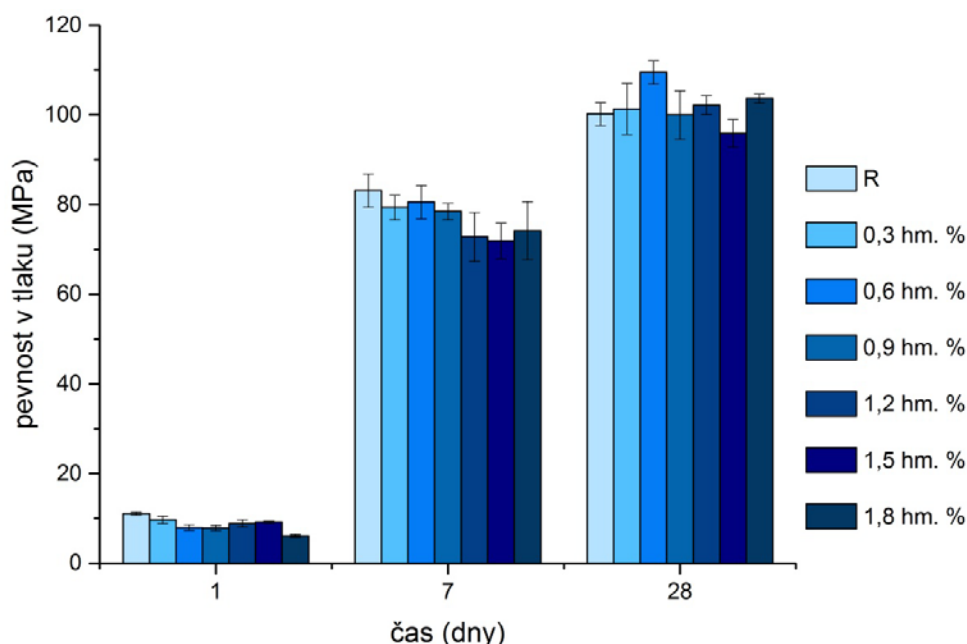
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,3 – 1,8 % hmotnosti cementu. Obvyklá dávka je 0,6 % hmotnosti cementu [36].

Tabulka č. 21: Pevnost v tlaku

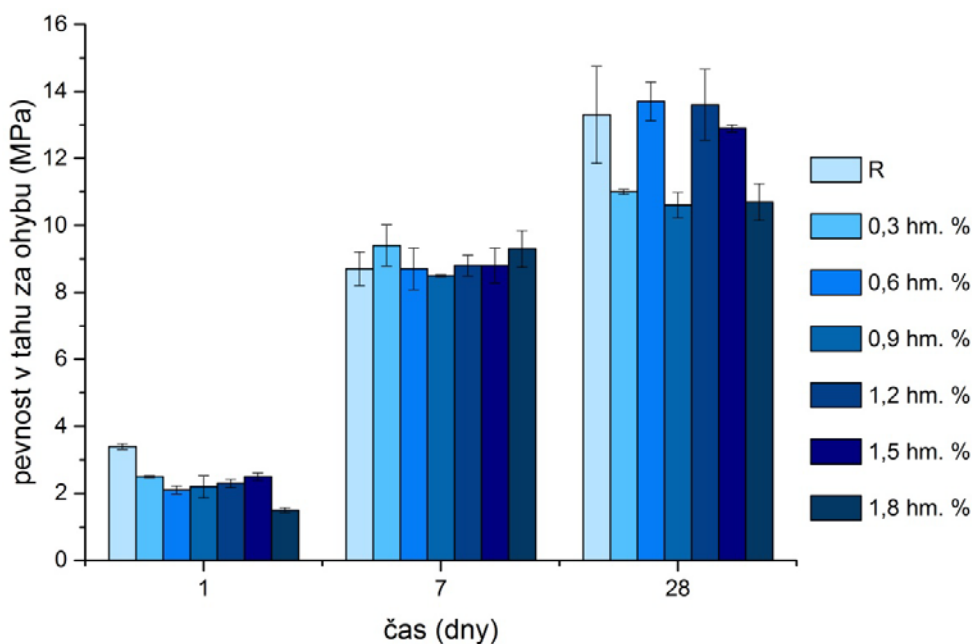
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	9,7	79,4	101,3
0,6	8,0	80,6	109,5
0,9	7,9	78,5	100,0
1,2	8,9	72,8	102,2
1,5	9,2	71,9	99,4
1,8	6,1	71,5	99,9

Tabulka č. 22: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,3	2,5	9,4	11,0
0,6	2,1	8,7	13,7
0,9	2,2	8,5	10,6
1,2	2,3	8,8	13,6
1,5	2,5	8,8	12,9
1,8	1,5	9,3	10,7



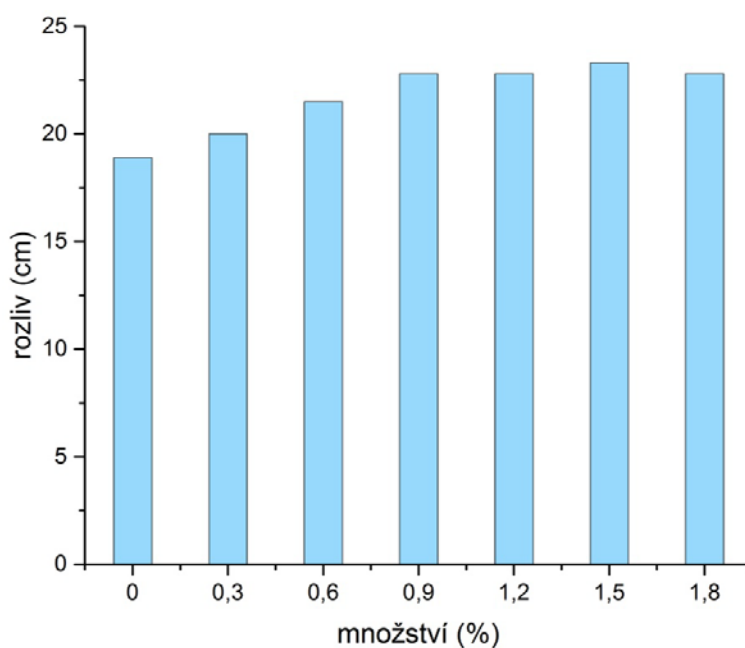
Obrázek 27: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných naftalenů



Obrázek 28: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných naftalenů

Tabulka 23: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,3	20,0
0,6	21,5
0,9	22,8
1,2	22,8
1,5	23,3
1,8	22,8



Obrázek 29: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přidavcích superplastifikátoru na bázi modifikovaných naftalenů

Pevnost v tlaku je po 1, 7 a 28 dnech u všech přísadků přibližně stejná jako referenční vzorek. Po 28 dnech zrání je pevnost v tahu za ohybu u přísadků 0,6; 1,2 a 1,5 hm. % stejná jako pevnost referenčního vzorku, ostatní přísadky superplastifikátoru mají výrazně nižší pevnost.

Zpracovatelnost se s malým přísadkem superplastifikátoru zlepšuje a od přísadku 0,9 hm. % se dále nemění.

4.1.9 Vliv přísadku superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů

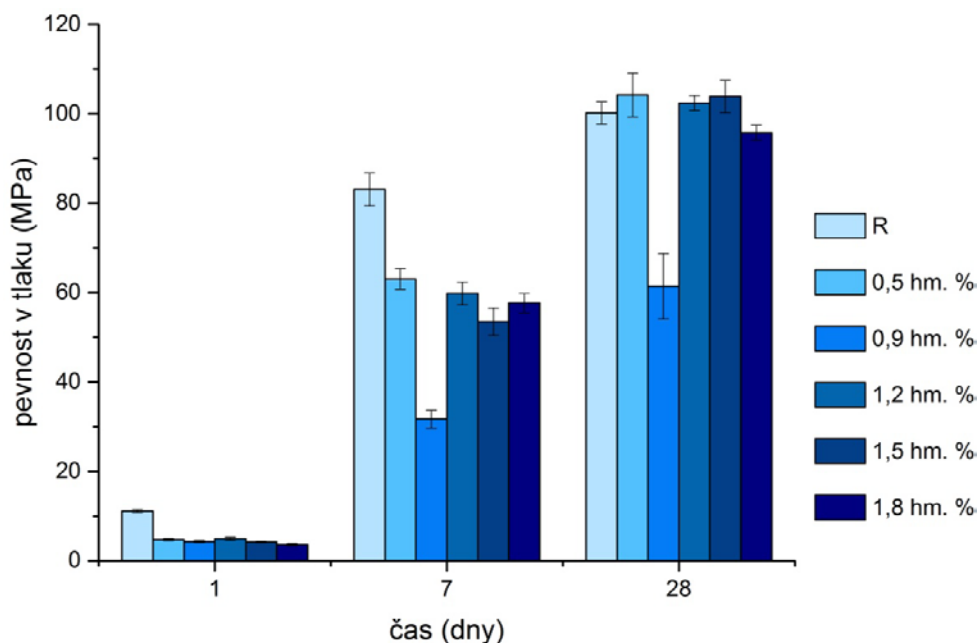
Dávkování je podle podmínek betonáže a požadavků na pevnosti betonu 0,5 – 1,8 % hmotnosti cementu.

Tabulka č. 24: Pevnost v tlaku

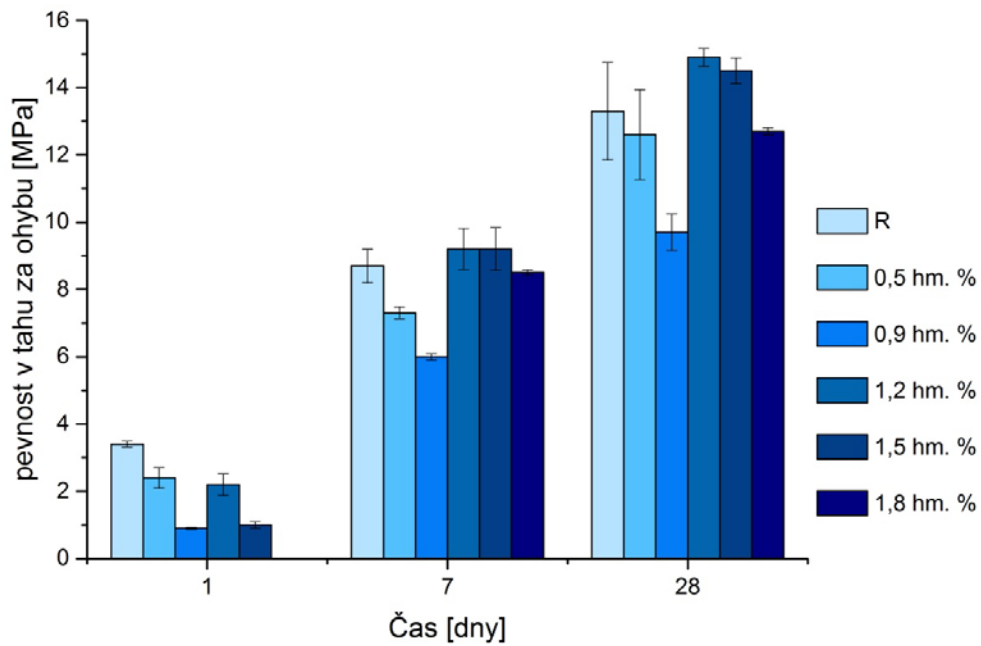
Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,5	4,7	61,1	104,2
0,9	4,3	31,7	61,4
1,2	4,9	62,0	102,4
1,5	4,2	57,1	103,9
1,8	3,6	57,7	95,8

Tabulka č. 25: Pevnost v tahu za ohybu

Množství [hm. %]	1. den	7. den	28. den
0,5	2,4	7,3	12,6
0,9	0,9	6,0	9,7
1,2	2,2	9,2	14,9
1,5	1,0	9,2	14,5
1,8	0,0	8,5	12,7



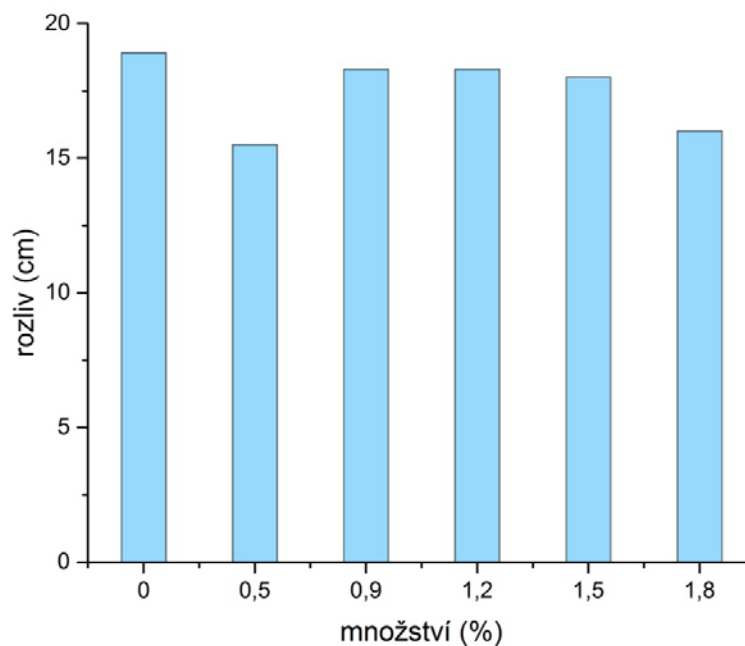
Obrázek 30: Pevnost v tlaku po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přísadkem superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů



Obrázek 31: Pevnost v tahu za ohybu po 1, 7 a 28 dnech zrání alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přidavkem superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů

Tabulka 26: Rozliv

Množství [hm. %]	rozliv [cm]
0,5	15,5
0,9	18,3
1,2	18,3
1,5	18,0
1,8	16,0



Obrázek 32: Zpracovatelnost směsí alkalicky aktivované vysokopecní strusky po různých přidavcích superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů

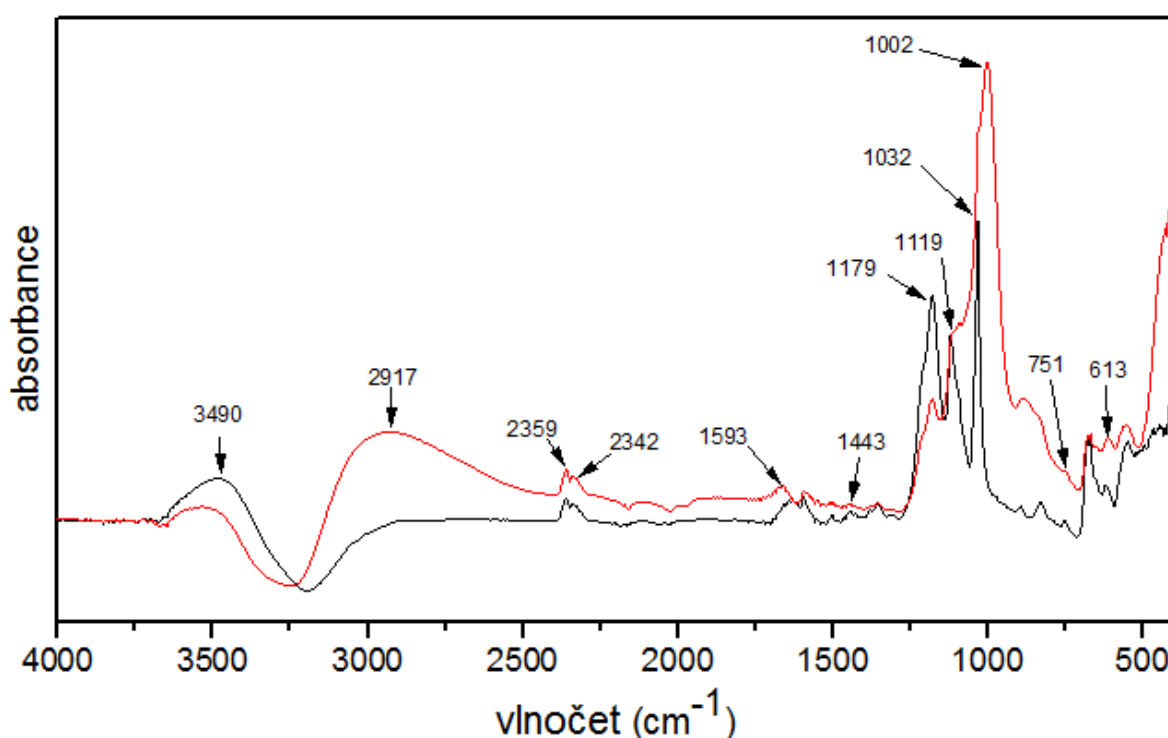
Po přidavku superplastifikátoru se pevnost v tlaku po 1 a 7 dnech zrání výrazně zhoršila oproti referenčnímu vzorku. Po 28 dnech byla pevnost přibližně stejná, kromě přidavku 0,9 hm. %, který má výrazně nižší pevnost oproti ostatním přidávkům.

Zpracovatelnost se vlivem superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu v jakémkoliv množství nezlepšila, referenční vzorek měl nejlepší zpracovatelnost. S malými přidávkami se zpracovatelnost zlepšovala, od přidavku 0,9 hm. % zůstala konstantní a od přidavku 1,2 hm. % se začala zhoršovat.

4.2 Infračervená spektra různých typů superplastifikátorů

V této části jsou porovnány spektra superplastifikátorů se spektry superplastifikátorů ve vodním skle. Superplastifikátory byly vybrány podle míry vlivu na zpracovatelnost.

4.2.1 Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi polynaftalenu

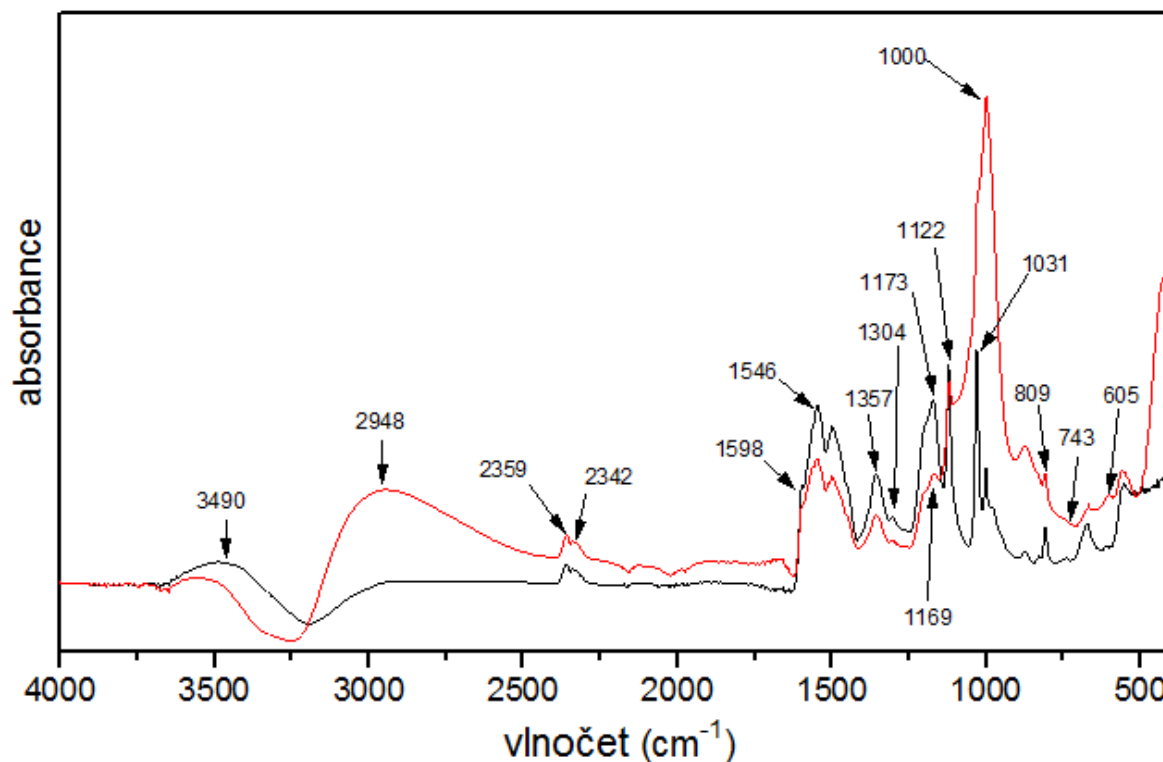


Obrázek 33: Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi polynaftalenu (černé spektrum) a spektrum stejného superplastifikátoru ve vodním skle (červené spektrum)

V obou spektrech se nachází absorpční pás v oblasti vlnově 2917 cm^{-1} odpovídající C-H vibracím v $-\text{CH}_2-$ a v oblasti vlnově 1593 cm^{-1} naznačující přítomnost aromatického jádra. Dále se zde nachází pás v oblasti vlnově 1443 cm^{-1} připadající C-H vibraci v $-\text{CH}_3$ a pás v oblasti vlnově 1179 cm^{-1} odpovídající C-O vibraci. Dále můžeme vidět absorpční pás v oblasti 1119 cm^{-1} , což souvisí s absorpcí alkyl substituovaného etheru, pás v oblasti vlnově 1032 cm^{-1} odpovídající C-O vibraci v primárních alkoholech a absorpční pás v oblasti vlnově 751 cm^{-1} naznačující přítomnost alifatického řetězce o délce $\text{C} \geq 3$. Ve spektru superplastifikátoru ve vodním skle se navíc nachází absorpční pásy v oblasti vlnově 1002 cm^{-1} připadající valenční vibraci Si-O-(Na) a v oblasti 613 cm^{-1} , což odpovídá deformační vibraci O-Si-O.

Ve všech spektrech se nachází absorpční pás v oblasti vlnočtu 3490 cm^{-1} připadající O–H vibracím ve všem, v čem se OH skupina vyskytuje i O–H vibracím mezi vodíkovými můstky. Ve všech spektrech se také nachází dublet pásů v oblastech vlnočtů 2359 a 2342 cm^{-1} , což odpovídá absorpci CO_2 .

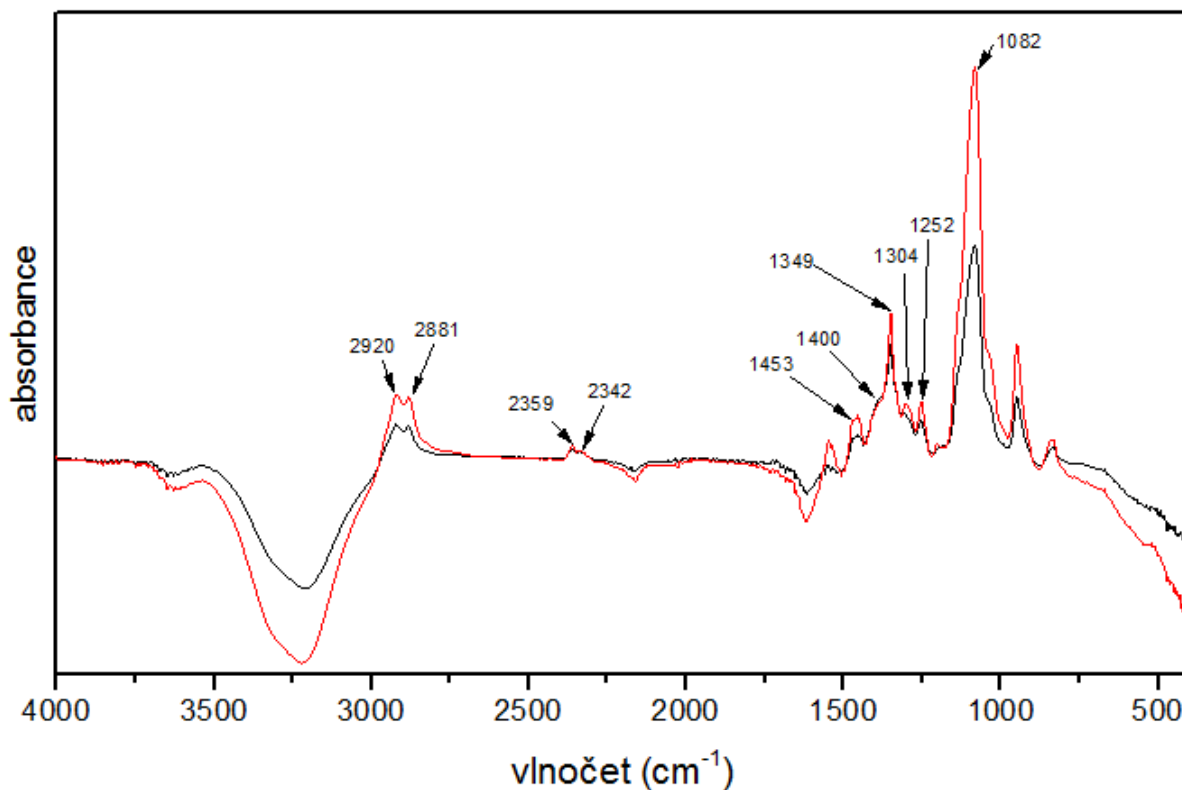
4.2.2 Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi polymelaminu



Obrázek 34: Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi polymelaminu (černé spektrum) a spektrum stejného superplastifikátoru ve vodním skle (červené spektrum)

V obou spektrech můžeme vidět absorpční pás v oblasti vlnočtu 2948 cm^{-1} odpovídající C–H vibracím v $-\text{CH}_2-$, pás v oblasti vlnočtu 1598 cm^{-1} odpovídající C=C vibracím v aromátech a pás v oblasti vlnočtu 1546 cm^{-1} odpovídající N–H vibracím v sekundárním aminu. Dále můžeme vidět absorpční pásy v oblastech 1357 a 1304 cm^{-1} odpovídající O–H vibracím v primárních a sekundárních alkoholech a pás v oblasti 1173 cm^{-1} připadající O–H vibracím v terciárním alkoholu nebo fenolu. Ve spektrech se také vyskytuje absorpční pás v oblasti 1122 cm^{-1} připadající C–O–C vibracím v alkyl substituovaných etherech a pás v oblasti 1031 cm^{-1} odpovídající C–O vibracím v primárním alkoholu. Dále ve spektrech nalezneme pás v oblasti 809 cm^{-1} , který naznačuje přítomnost triazinu a specifický pás v oblasti 745 cm^{-1} naznačující přítomnost alifatického řetězce o délce $C \geq 3$. Ve spektru superplastifikátoru ve vodním skle se navíc nachází absorpční pás v oblasti 1169 cm^{-1} , který odpovídá valenční vibraci Si–O, pás v oblasti 1000 cm^{-1} odpovídající valenční asymetrické vibraci Si–O–(Na) a pás v oblasti 605 cm^{-1} připadající deformační asymetrické vibraci O–Si–O.

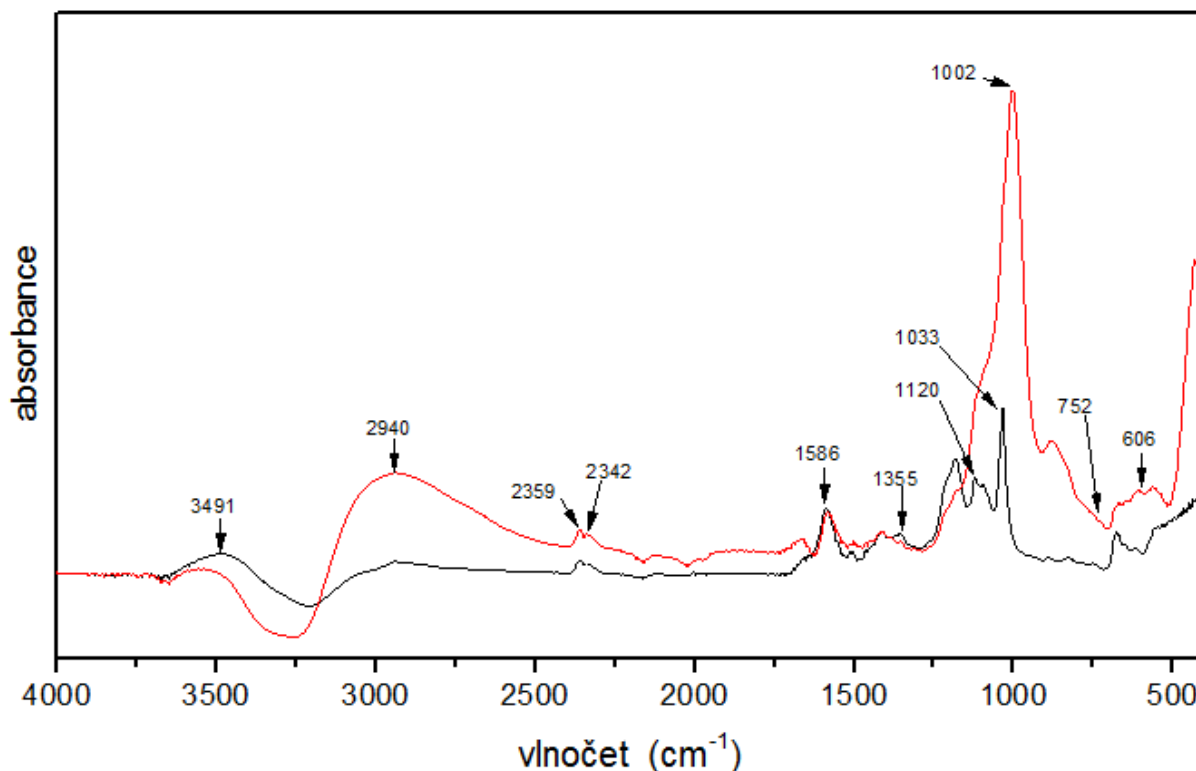
4.2.3 Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů



Obrázek 35: Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polykarboxylátů (černé spektrum) a spektrum stejného superplastifikátoru ve vodním skle (červené spektrum)

Ve spektrech se nachází pásy s vlnočty 2920 a 1453 cm^{-1} připadající C–H vibracím v $-\text{CH}_2-$. Nachází se zde také C–H vibrace v $-\text{CH}_3$ s vlnočtem 2881 cm^{-1} a raménkem v oblasti 1400 cm^{-1} . Dále se ve spektrech nachází pásy v oblastech 1349 a 1304 cm^{-1} připadající vibracím karboxylátového aniontu $-\text{COO}^-$ a pás v oblasti 1252 cm^{-1} připadající O–H vibraci v primárních a sekundárních alkoholech. Nachází se zde také poměrně intenzivní pás v oblasti 1082 cm^{-1} odpovídající C–O vibracím nebo C–O–C vibracím v alkyl substituovaných etherech.

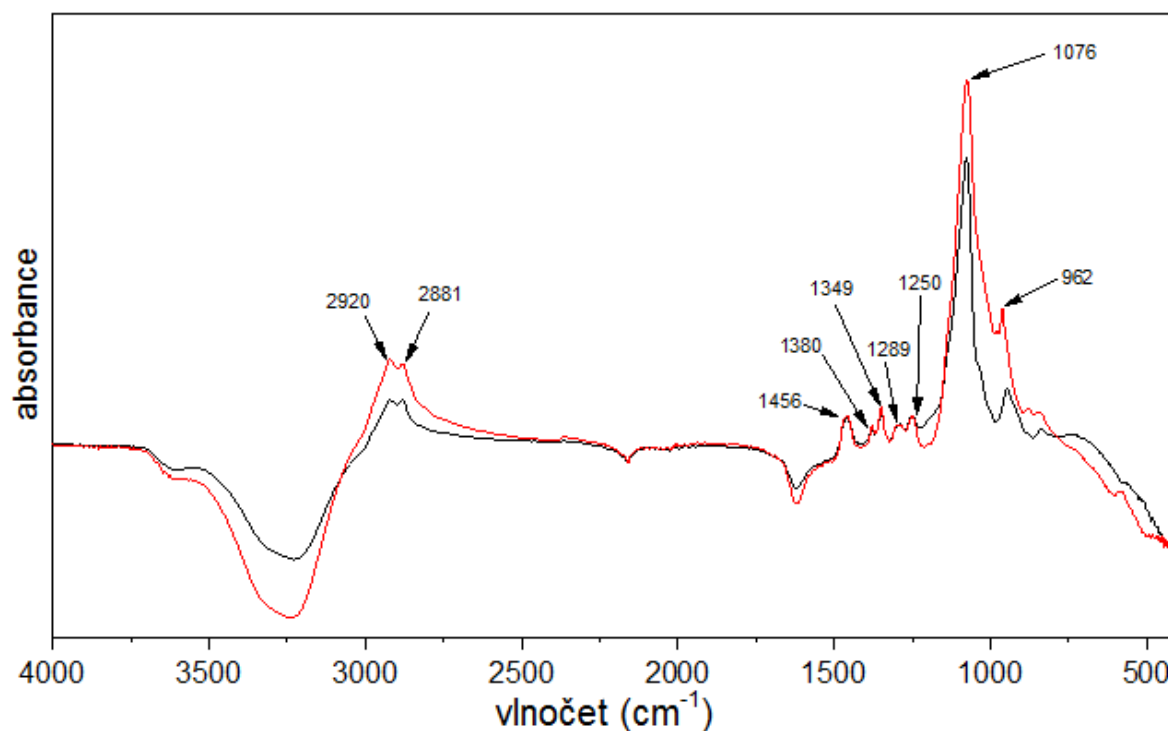
4.2.4 Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polynaftalenů



Obrázek 36: Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polynaftalenů (černé spektrum) a spektrum stejného superplastifikátoru ve vodním skle (červené spektrum)

V obou spektrech se vyskytuje absorpční pás v oblasti 2940 cm^{-1} odpovídající C–H vibracím v $-\text{CH}_2-$. Dále můžeme vidět absorpční pás v oblasti 1586 cm^{-1} připadající C=C vibracím v aromatickém jádře, pás v oblasti 1355 cm^{-1} odpovídající O–H vibracím v primárním a sekundárním alkoholu, pás v oblasti 1120 cm^{-1} odpovídající C–O vibracím nebo C–O–C vibracím v alkyl substituovaných etherech. Dále se ve spektrech nachází pás v oblasti 1033 cm^{-1} připadající C–O vibraci v primárním alkoholu a specifický pás v oblasti 752 cm^{-1} naznačující přítomnost alifatického řetězce o délce $C \geq 3$. Ve spektru superplastifikátoru ve vodním skle se navíc nachází intenzivní pás v oblasti 1002 cm^{-1} připadající valenční asymetrické vibraci Si–O–(Na) a pás v oblasti 606 cm^{-1} připadající deformační asymetrické vibraci O–Si–O.

4.2.5 Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů



Obrázek 37: Infračervené spektrum superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů (černé spektrum) a spektrum stejného superplastifikátoru ve vodním skle (červené spektrum)

Ve spektrech se nachází pásy s vlnočty 2920 a 1456 cm^{-1} připadající C–H vibracím v $-\text{CH}_2-$ a pásy s vlnočty 2881 a 1380 cm^{-1} připadající C–H vibracím v $-\text{CH}_3$. Dále se ve spektrech nachází pásy s vlnočty 1349 a 1289 cm^{-1} odpovídající O–H vibracím v primárních a sekundárních alkoholech a pás s vlnočtem 1250 cm^{-1} odpovídající P=O vibracím v polyfosfonátu. Poměrně intenzivní pás s vlnočtem 1076 cm^{-1} odpovídá C–O vibracím.

5. ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo připravit směsi vysokopecní strusky aktivovanou vodním sklem, na které byly aplikovány různé superplastifikátory. Superplastifikátory byly zvoleny tak, aby každý z nich zastupoval hlavní složku komerčně dostupných produktů. Proto byly použity superplastifikátory na bázi melaminu, naftalenu, lignosulfonátu a polykarboxylátu. Dávkování se řídilo podle technického listu každého plastifikátoru a bylo dopočítáno na hmotnost strusky. Na připravených směsích byl zkoumán vliv superplastifikátorů na zpracovatelnost a na mechanické vlastnosti.

Alkalicky aktivovaná vysokopecní struska s různými přísadami superplastifikátorů na bázi polynaftalenu, modifikovaných polynaftalenů, polymelaminu, polykarboxylátů a modifikovaných polykarboxylátů měla vyšší pevnost v tlaku po 28 dnech zrání než referenční vzorek. Naopak nejnižší pevnost v tlaku vykazovala alkalicky aktivovaná struska s nejvyšším doporučeným přírůstkem superplastifikátoru na bázi modifikovaných polyfosfonátů. Alkalicky aktivovaná struska s přírůstkem superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a polyfosfonátu vykazuje výrazně nižší pevnosti po 28 dnech zrání oproti referenčnímu vzorku. S přírůstkem jakéhokoliv množství plastifikátoru lignosulfonátového typu vykazuje stejnou pevnost v tlaku jako referenční vzorek.

Bylo zjištěno, že zpracovatelnost závisí na typu a dávkování plastifikátoru. Většina superplastifikátorů zlepšuje zpracovatelnost. Výjimku tvoří superplastifikátor na bázi polykarboxylátu, kde jakýkoliv přírůstek nedosáhl lepší zpracovatelnosti než referenční vzorek. Zajímavý je plastifikátor na bázi lignosulfonátu, který s minimálním doporučeným přírůstkem výrazně zlepšuje zpracovatelnost a zároveň je nejlépe cenově dostupný.

Pomocí infračervené spektrometrie bylo zjištěno, že vlivem alkalického prostředí tvořeného vodním sklem, nedochází k žádným změnám ve struktuře superplastifikátoru.

Z výsledků práce lze říci, že některé plastifikátory a superplastifikátory mohou být využívány ke zlepšení zpracovatelnosti alkalicky aktivované vysokopecní strusky. A správně zvoleným typem superplastifikátoru a dávkováním lze dosáhnout vyšších pevností v tlaku i v tahu za ohybu.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KASHANI, A., J.L. PROVIS, J. XU, A.R. KILCULLEN, G.G. QIAO a J.S.J. VAN DEVENTER. Effect of molecular architecture of polycarboxylate ethers on plasticizing performance in alkali-activated slag paste. *Journal of Materials Science* [online]. 2014, vol. 49, issue 7, s. 2761-2772 [cit. 2014-12-30]. DOI: 10.1007/s10853-013-7979-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-013-7979-0>
- [2] WINNEFELD, F., S. BECKER, J. PAKUSCH a T. GÖTZ., Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2007, vol. 29, issue 4, s. 251-262 [cit. 2015-04-12]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946507000054>
- [3] KOMLJENović, M. M., Z. BAŠČAREVIĆ, N. MARJANOVIĆ a V. NIKOLIĆ. Decalcification resistance of alkali-activated slag. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2012, 233-234, s. 112-121 [cit. 2014-12-06]. DOI: 10.1016/j.jhazmat. 2012.06.063. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389412007066>
- [4] ŠKVÁRA, F., Alkali activated materials or geopolymers?. 2007. Dostupné z: http://www.ceramics-silikaty.cz/2007/pdf/2007_03_173.pdf
- [5] ŠKVÁRA, F., Alkalicky aktivované materiály Alkalicky aktivované materiály geopolymery. 2007. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [6] KALINA, L., Syntéza aluminosilikátových systémů na bázi geopolymérů orientovaná na využívání sekundárních surovin. Brno, 2011. Zkrácená verze doktorské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie, technologie a vlastností materiálů. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [7] PACHECO-TORGAL, F., J. CASTRO-GOMES a S. JALALI. Alkali-activated binders: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2008, vol. 22, issue 7, s. 1305-1314 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807002462>
- [8] BARBOSA, V.F.F., K.J.D MACKENZIE a C. THAUMATURGO. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials* [online]. 2000, vol. 2, issue 4, s. 309-317 [cit. 2014-12-28]. DOI: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466604900000416>
- [9] AĪTCIN, P.C., Vysokohodnotný beton. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [10] FRÝBORTOVÁ, I., Možnosti alkalické aktivace ocelářské strusky. Brno, 2010. 51s. Bakalářská práce na Fakultě chemické Vysokého učení technického v Brně, Ústav chemie materiálů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [11] GAZDIČ, D., FRIDRICHOVÁ, M., NOVÁK, J. Využití vysokopecní strusky a přírodního anhydritu k přípravě struskosíranového pojiva. In *Informační zpravodaj* -

- cement, vápno, sádra*. 1. Skalský dvůr: Výzkumný ústav maltovin Praha, 2008. s. 140-146.
- [12] PACHECO-TORGAL, F., J. CASTRO-GOMES a S. JALALI. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*[online]. 2008, vol. 22, issue 7, s. 1315-1322 [cit. 2014-12-28]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807000918>
- [13] HLAVÁČ, J., *Základy technologie silikátů*. 2. uprav.vyd. Praha: SNTL, 1981, 516 s. ISBN 80-200-2148-4.
- [14] LI, C., H. SUN a L. LI., A review: The comparison between alkali-activated slag (Si Ca) and metakaolin (Si Al) cements. *Cement and Concrete Research* [online]. 2010, vol. 40, issue 9, s. 1341-1349 [cit. 2015-05-01]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461000089X>
- [15] COLLEPARDI, M., *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [16] SPIRATOS, N., *Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology, and practice*. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2003, xiii, 322 s. ISBN 09-731-5071-8.
- [17] HANUŠ, V., L. VRBA, P. ŠTEMBERK a O. ŠEVČÍK. *Vliv současných chemických přísad na výsledné vlastnosti betonu* [online]. 2012 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS_2012_prisady_primesi.pdf
- [18] COLLEPARDI, M., Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1998, vol. 20, 2-3, s. 103-112 [cit. 2015-04-03]. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00071-7. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946598000717>
- [19] PROVIS, J.L. a J. VAN DEVENTE. 2014. *Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Dordrecht: Springer, xiv, 388 s. ISBN 978-94-007-7671-5.
- [20] ROY, D. M., Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research* [online]. 1999, vol. 29, issue 2, s. 249-254 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00093-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698000933>
- [21] WANG, S.-D., K.L. SCRIVENER a P.L. PRATT. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research* [online]. 1994, vol. 24, issue 6, s. 1033-1043 [cit. 2015-03-23]. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90026-4. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884694900264>
- [22] BAKHAREV, T., J.G. SANJAYAN a Y.-B CHENG. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2000, vol. 30, issue 9, s. 1367-1374 [cit. 2015-03-23]. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00349-5. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884600003495>

- [23] COLLINS, F. a J.G. SANJAYAN. Early Age Strength and Workability of Slag Pastes Activated by NaOH and Na₂CO₃. *Cement and Concrete Research* [online]. 1998, vol. 28, issue 5, s. 655-664 [cit. 2015-03-23]. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00025-8. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698000258>
- [24] PALACIOS, M., Y.F. HOUST, P. BOWEN a F. PUERTAS. Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2009, vol. 39, issue 8, s. 670-677 [cit. 2015-03-18]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.05.005. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884609001082>
- [25] PALACIOS, M., F. PUERTAS, P. BOWEN a F. PUERTAS. Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*[online]. 2005, vol. 35, issue 7, s. 1358-1367 [cit. 2015-03-18]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.014. Dostupné z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888460400451X>
- [26] PALACIOS, M., F. PUERTAS, P. BOWEN a F. PUERTAS. Rheology and Setting of Alkali-Activated Slag Pastes and Mortars: Effect of Organic Admixture. *ACI Materials Journal* [online]. 2008-3-1, vol. 105, issue 2, s. - [cit. 2015-03-18]. DOI: 10.14359/19754. Dostupné z:<http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details>
- [27] Infračervená spektroskopie. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>
- [28] KLOUDA, P., *Moderní analytické metody*. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2003, 132 s. ISBN 80-863-6907-2.
- [29] VOLKA, K., M. TKADLECOVÁ a K. ZÁRUBA. *Příklady z analytické chemie pro bakaláře* [online]. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 100 s. [cit. 2015-05-01]. ISBN 80-708-0610-9. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-610-9/pages-img/
- [30] CHRYSO: CHRYSO® Fluid CE 40 W. *CHRYSO Chemie s.r.o* [online]. [2008] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/48962/ChrysoFluid_CE40W.pdf
- [31] CHRYSO: CHRYSO® Fluid GT. *CHRYSO Chemie s.r.o* [online]. [2009] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/48960/ChrysoFluid_GT.pdf
- [32] CHRYSO: CHRYSO® Fluid Premia 330. *CHRYSO Chemie s.r.o* [online]. [2011] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/49089/TL_Premia_330.pdf
- [33] CHRYSO: CHRYSO® Fluid Optima 100. *CHRYSO Chemie s.r.o* [online]. [2012] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z:http://fr.chryso.com/upload/t_documents/Fichier_L2/42914/FT_CHRYSOFluid_Optima_100_GB.pdf

- [34] CHRYSO: CHRYSO® Fluid Optima 185. CHRYSO Chemie s.r.o [online]. [2009] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/49067/ChrysoFluid_Optima_185.pdf
- [35] CHRYSO: CHRYSO®Plast 460. CHRYSO POLSKA Sp. z o.o. [online]. [2014] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z:http://www.chryso.pl/upload/t_documents/Fichier_L1/48744/Plast%20460%20karta%20techniczna.pdf
- [36] CHRYSO: CHRYSO® Plast 760. *CHRYSO Chemie s.r.o.* [online]. [2009] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/48946/ChrysoPlast_760.pdf