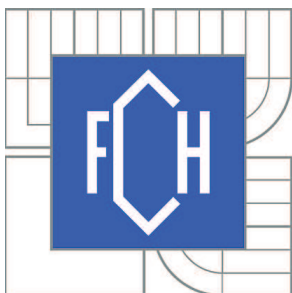


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

VLIV KAMENIVA NA VLASTNOSTI VYSOKOHODNOTNÝCH BETONŮ.

THE INFLUENCE OF AGGREGATE ON THE PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE
CONCRETE.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

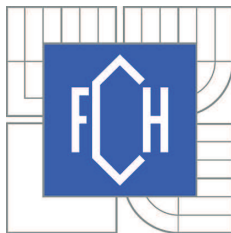
ONDŘEJ BEZDĚK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ŠILER, Ph.D.

BRNO 2013



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

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	FCH-BAK0753/2012	Akademický rok: 2012/2013
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Ondřej Bezděk	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	Ing. Pavel Šiler, Ph.D.	
Konzultanti:		

Název bakalářské práce:

Vliv kameniva na vlastnosti vysokohodnotných betonů.

Zadání bakalářské práce:

Práce bude zaměřena na měření mechanických vlastností a průběhu hydratace cementových směsí s různými druhy kameniva.

Termín odevzdání bakalářské práce: 10.5.2013

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Ondřej Bezděk
Student(ka)

Ing. Pavel Šiler, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 14.2.2013

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá studiem vlivu jednotlivých kameniv na mechanické vlastnosti vysokohodnotných betonů. U vzorků byly sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 1, 7 a 28 dnech. Dále byl sledován průběh hydratační reakce pomocí isoperibolické kalorimetrie a byla provedena laserová analýza velikosti částic jednotlivých kameniv. Jako suroviny byly použity: portlandský cement CEM I 42,5 R-Sc Mokrý, speciálně umletý křemičitý písek, kalcinovaný bauxit, zkušební písek jemný ČSN EN 196-1, zkušební písek střední ČSN EN 196-1, zkušební písek hrubý ČSN EN 196-1 a polykarboxylátový superplastifikátor Glenium Ace 40.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the influence of aggregates on the mechanical properties of high-performance concrete. The flexural strength and the compressive strength were observed after 1, 7 and 28 days. The process of hydration was monitored using isoperibolic calorimetry. Laser particle size analysis of aggregates was also performed. As materials were used: Portland cement CEM I 42,5 R-Sc Mokrý, finely ground silica sand, calcinated bauxite, fine test sand ČSN EN 196-1, medium test sand ČSN EN 196-1, rough test sand ČSN EN 196-1 and polycarboxylate superplasticizer Glenium Ace 40.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokohodnotný beton, portlandský cement, kamenivo, isoperibolická kalorimetrie, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu.

KEYWORDS

High-performance concrete, portland cement, aggregates, isoperibolic calorimetry, compressive strength, flexural strength.

BEZDĚK, O. *Vliv kameniva na vlastnosti vysokohodnotných betonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Šiler, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. 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.

.....
Ondřej Bezděk

PODĚKOVÁNÍ

Předně bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Pavlu Šilerovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a čas, který mi věnoval při vytváření této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě podporovali během studií.

OBSAH

1 Úvod.....	6
2 Teoretická část.....	7
2.1 Vysokohodnotný beton.....	7
2.2 Portlandský cement	8
2.2.1 Portlandský slínek	8
2.2.2 Výroba portlandského slínku.....	8
2.2.3 Síran vápenatý	11
2.2.4 Hydratace portlandského cementu.....	11
2.3 Superplastifikátory	13
2.3.1 Typy superplastifikátorů.....	14
2.3.2 Mechanismus účinku superplastifikátorů	15
2.4 Kamenivo	15
2.5 Faktory ovlivňující pevnost betonu	18
2.5.1 Alkalicko-křemičitá reakce.....	18
3 Experimentální část.....	18
3.1 Použité suroviny	18
3.2 Použité přístroje a zařízení	18
3.3 Popis použitých metod	19
3.3.1 Laserová analýza velikosti částic	19
3.3.2 Mechanické vlastnosti	20
3.3.3 Isoperibolická kalorimetrie.....	21
3.3.4 Rentgenová fluorescenční spektrometrie.....	23
3.4 Příprava vzorků	24
4 Výsledky a diskuze	25
4.1 Laserová analýza velikosti částic	25
4.2 Mechanické vlastnosti	28
4.2.1 Mechanické vlastnosti směsí jednotlivých kameniv	29
4.2.2 Orientační rozbor složení vody.....	33
4.3 Isoperibolická kalorimetrie.....	35
3.1 Kalorimetrie směsí jednotlivých kameniv	36
5 Závěr.....	43
6 Literatura.....	45
7 Seznam použitých zkratk a symbolů	47

1 ÚVOD

Nejpoužívanějším stavebním materiálem současnosti jsou betony na bázi portlandského cementu. Jistě se dá předpokládat, že tomu tak bude i v následujících desetiletích. S rostoucími požadavky na zlepšení technologických parametrů byly v 70. letech minulého století vytvořeny betony s výrazně vyšší pevností. Ty byly sice vytvořeny pomocí stejné technologie jako běžný beton, ale výchozí suroviny byly vybírány s mnohem větší pečlivostí a s ohledem na jejich vysokou kvalitu.

S nároky na další zvýšení pevnosti a zlepšení užitných parametrů začaly být přidávány do betonu plastifikační a časem především i superplastifikační přísady. Nejenže tyto přísady umožňují vytvářet pevnější betony, ale podle užití dochází i ke zlepšení ostatních užitných vlastností. Díky tomu tyto betony nelze nazývat pouze jako vysokopevnostní betony, a proto se vžilo jako mnohem lepší a více odpovídající označení vysokohodnotné betony.

V dnešní době si nelze efektivní výrobu vysokohodnotných betonů bez použití superplastifikačních přísad vůbec představit. Ty jsou již dnes esenciální složkou, ale jejich použití se samozřejmě neobejde bez problémů. Výběr vhodného superplastifikátoru je klíčovým aspektem při výrobě vysokohodnotného betonu.

S růstem tlakové pevnosti cementu se ovšem musí věnovat mnohem větší pozornost výběru kameniva. Nedostatečně pevné a kvalitní kamenivo se může projevit jako Achillova pata celé betonové směsi a může nepříznivě ovlivnit jeho pevnost. S ohledem na užití kameniva je třeba také pečlivě volit jeho zrnitost a maximální velikost zrna, neboť prioritní snahou při výrobě vysokohodnotného betonu je potřeba udržení co nejmenšího přijatelného vodního součinitele. Také je nutno vysokohodnotný beton včasné a vhodně ošetřovat, aby bylo minimalizováno celkové smrštění a aby mohlo zhydratovat co největší množství cementu.

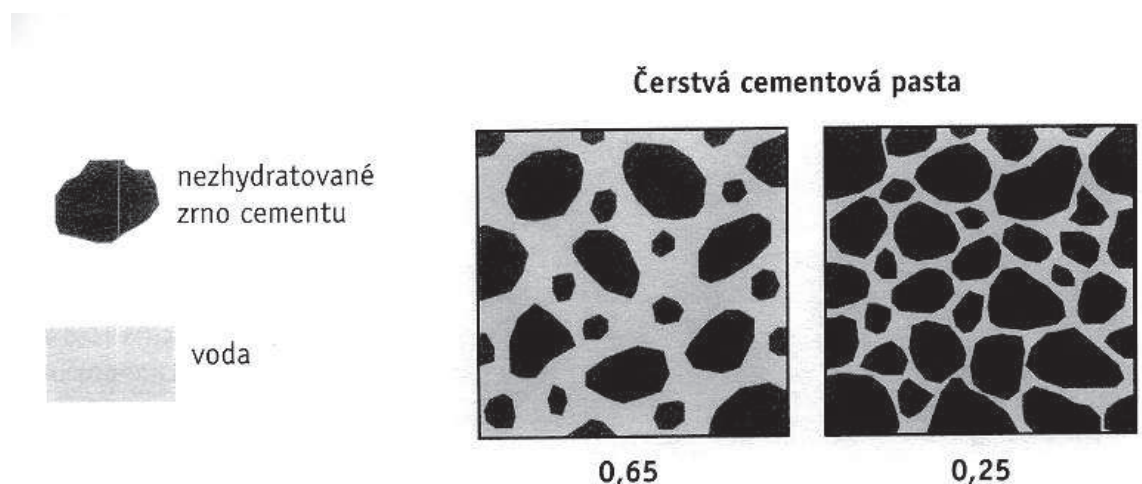
Cílem práce je studium vývoje mechanických vlastností při použití jednotlivých typů kameniv za měnícího se vodního součinitele a sledování hydratace těchto směsí pomocí isoperibolické kalorimetrie. Z mechanických vlastností byla měřena pevnost v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Vysokohodnotný beton

Z hlediska materiálu není vysokohodnotný beton ničím jiným, než betonem s velmi nízkou pórovitostí. Té je dosaženo zejména použitím mnohem menšího množství záměsové vody než v běžném betonu, takže jsou částice cementu a minerálních příměsí vzájemně uspořádány mnohem těsněji, než v běžné betonové směsi. S poklesem pórovitosti ztvrdlé cementové pasty roste pevnost betonu tak dlouho, dokud je kamenivo, zejména hrubé kamenivo, dostatečně pevné. Proto je výběr a rozdělení složek vysokohodnotného betonu mnohem závažnější problém, než je tomu v případě běžného betonu [2].

Jako limitní hranice vodního součinitele mezi běžným a vysokohodnotným betonem se jeví hodnota 0,4. Tato hodnota není určena zcela libovolně, ale je podložena skutečností, že je velice obtížné vytvořit dobře zpracovatelný beton s běžně dostupným portlandským cementem, pokud je vodní součinitel nižší než 0,4. Kromě toho je tato hodnota těsně u teoretické hodnoty potřebné pro úplnou hydrataci portlandského cementu. Jakmile dochází k poklesu vodního součinitele pod 0,4, tak má vysokohodnotný a běžný beton nejen hodně rozdílné tlakové pevnosti, ale i zcela odlišnou mikrostrukturu [2].



Obrázek 1: Schéma dvou čerstvých cementových past, které mají vodní součinitel 0,65 a 0,25 [2]

Co do požadavků na tyto betony nad prostou vysokou pevností dominují nároky na odolnost a vysoké užité parametry nejrůznější povahy (schopnost samozhutnění, vysoká trvanlivost, nízká hmotnost, vysoká plastická tvárnost, vysoké estetické požadavky). Charakteristická je snaha, spíše ovšem apriorní nutnost, doplňovat standardní složky betonu dalšími komponenty, typicky rozptýlenou výztuží, větším množstvím příměsí různého druhu, speciálními druhy kameniva, modifikovaným cementem nebo dokonce směsí několika pojiv a

širokou škálou výrobků stavební chemie. Takto vytvářené vysokohodnotné betony jsou v řadě případů spíše už kompozity, klasickému betonu (i cenově) poměrně vzdálené. Téměř vždy se jedná o experimentální, jedinečná řešení. Jejich normalizace a zavedení do praxe ve větším měřítku je až na výjimky v počátcích, nebo se o nich zatím vůbec neuvažuje. Typickými zástupci jsou SCC (Self-Compacting Concrete) – samozhutnitelný beton, HDC (High-Durability Concrete) – vysokotrvanlivý beton [9].

2.2 Portlandský cement

Portlandský cement je hydraulické pojivo, to je jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě [1]. Portlandský cement se v České republice vyrábí podle normy ČSN-EN 197-1.

Portlandský cement se skládá ze dvou hlavních složek, portlandského slínku a síranu vápenatého.

2.2.1 Portlandský slínek

Portlandský slínek je produktem výpalu surovinové moučky, která obsahuje vhodný poměr čtyř hlavních oxidů (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3). Surovinová moučka se může skládat z vápence, který do směsi vnáší CaO , z jílu nebo lupku, který vnáší SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 a případných korekčních přísad pro dosažení správných poměrů oxidů. Některé přírodní křemičité vápence obsahují SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 v takovém poměru, že je možné z nich pálit portlandský slínek pouze po drobných korekcích. Jako korekční přísady se používá písek (zdroj SiO_2), bauxit (zdroj Al_2O_3) a oxid železitý (Fe_2O_3) [2].

2.2.2 Výroba portlandského slínku

Surovinová moučka se po společném mletí a mísení zahřívá na teplotu kolem 1 450 °C v rotačních pecích. Při postupném zvyšování teploty se ze směsi odstraňuje voda. Sušení je ukončeno kolem 200 °C. Následně se zvyšováním teploty dochází k těmto procesům potřebným pro vznik slínku [3]:

1. Rozklady pevných látek (dehydratace jílových minerálů, rozklad CaCO_3)
2. Vzájemné reakce složek v pevném stavu, později za účasti taveniny
3. Tání eutektik, rozpouštění pevných látek v tavenině

Rozklad pevných látek nastává nejdříve. Ztráta chemicky vázané vody v kaolinitu probíhá od 500 °C. Produkt dehydratace je velmi reaktivní, takže vstupuje do reakce s CaO, resp. CaCO₃:



C₂S a CA jsou prvními produkty reakcí v pevném stavu. Začínají se tvořit od 700 °C, za předpokladu, že je směs surovin jemná a dobře promísená. CA vzniká dříve než C₂S. Zároveň se vznikem CA se tvoří C₂F a C₄AF.

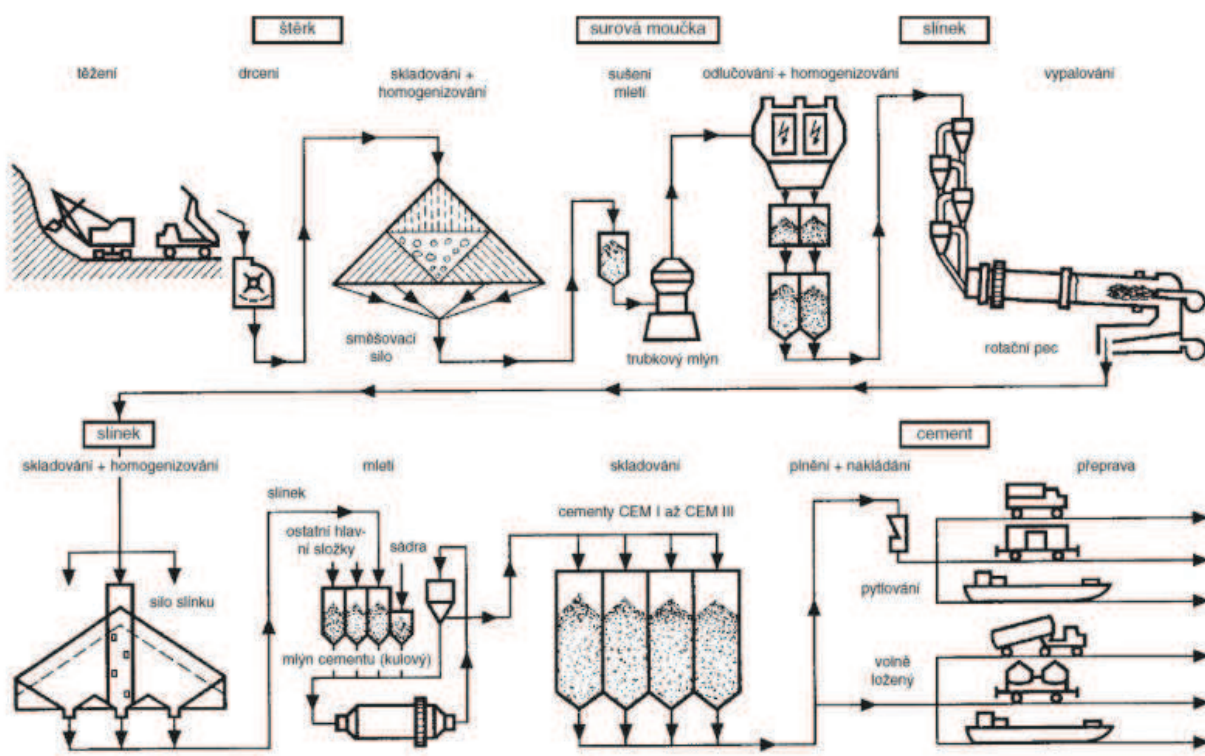
Od 900 °C probíhá reakce za vzniku C₃A:



A od 1 250 °C se tvoří C₃S:



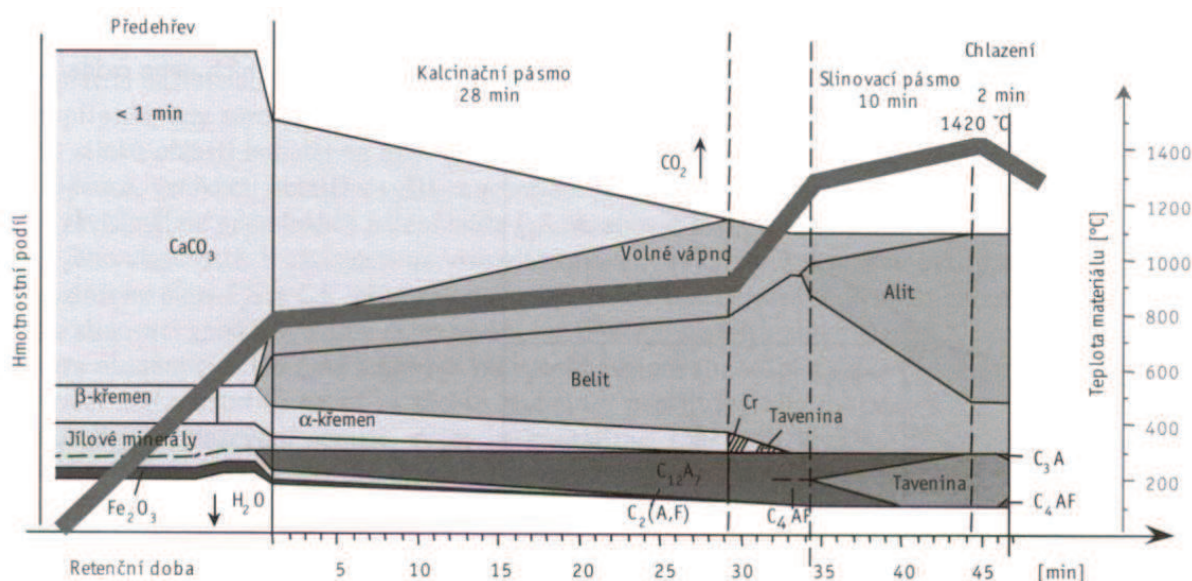
Reakce, jimiž vznikají slinkové materiály nabývá dostatečné rychlosti až v rozmezí teplot 1 350 až 1 450 °C. Tato oblast teplot je nejdůležitější hlavně proto, že zde vzniká slinkový materiál C₃S, který je nositelem typických vlastností portlandského cementu [3].



Obrázek 2: Schéma výroby cementu v cementárně [4]

Aby došlo ke stabilizaci silikátových fází v jejich reaktivních formách, je třeba slínek po vypálení ve slinovací zóně rotační pece rychle ochladit a tak zajistit, aby zůstaly fáze v jejich vysokoteplotní formě. Pokud by byl portlandský slínek pomalu ochlazován na pokojovou teplotu, obsahovala by vzniklá směs γ - C_2S a pálené vápno (CaO), tedy termodynamicky nejstabilnější produkty, bez hydraulických vlastností [2].

Role přídavku Al_2O_3 a Fe_2O_3 spočívá ve snížení teplot, nutných pro výpal portlandského slínku. Aluminátové a feritové fáze se v průběhu slinování taví a přítomnost této tekuté fáze značně snižuje teplotu tvorby C_3S a umožňuje iontům Ca^{2+} rychleji difundovat do rychleji vznikající fáze C_2S [2].



Obrázek 3: Schéma procesů probíhajících v cementářské peci [2]

Praxe ukazuje, že optimální obsah taveniny je v rozsahu 12 až 20 %, vztaženo na celkovou hmotnost slinkových fází. Pokud by byl obsah taveniny příliš vysoký, mohlo by dojít k jejímu uvolňování ze silikátových fází a k jejímu usazování na vnitřních stěnách pece. Nízký obsah taveniny by naopak vedl ke ztížení difuze Ca^{2+} iontů do C_2S fáze. Tudíž by slínek poté obsahoval méně C_2S a více nezreagovaného vápna. Navíc by tento slínek byl velmi abrazivní a rychle by obrušoval žáruvzdornou vyzdívku pece [3].

2.2.3 Síran vápenatý

Další důležitou složkou portlandského cementu je síran vápenatý. V portlandském cementu se může vyskytovat v různých formách [5]:

• přírodní krystalický anhydrit	CaSO_4
• sádrovec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
• hemihydrát (sádra)	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
• dehydratovaný sádrovec (rozpuštěný anhydrit)	CaSO_4
• technický síran vápenatý (energósádrovec nebo chemosádrovec)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Dnes se využívá především energósádrovec. Jedná se o průmyslový odpad odsiřování v elektrárnách, který je podstatně čistší než přírodní sádrovec. Je možno přidávat i anhydrit či hemihydrát. Podle formy se liší svou rozpustností a rychlostí rozpouštění [2].

2.2.4 Hydratace portlandského cementu

Hydratace portlandského cementu je velice komplexní a složitý proces, dá se rozdělit do 5 základních následných dějů:

1. *Smíchání s vodou*

V průběhu tohoto stádia jsou z různých fází portlandského cementu uvolňovány ionty do roztoku. Proces rozpouštění je poměrně rychlý a hydratace exotermická. Povrch částic cementu se začíná pokrývat hydratovaným kalcium-silikátem (CSH gel) vytvořeným z Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ a OH^- iontů, pocházejících ze silikátových fází slínku, a ettringitem ($\text{C}_6\text{AS} \square_3\text{H}_{32}$) vytvořeným reakcí Ca^{2+} iontů, $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, SO_4^{2-} , a OH^- pocházejících z intersticiální fáze a z různých forem síranu vápenatého, přimílaného k portlandskému slínku [2].

2. *Indukční perioda*

Rychle vzrůstající hodnota pH a koncentrace Ca^{2+} iontů v záměsové vodě snižuje spolu s hydráty vytvořenými na povrchu částic rozpustnost fází portlandského slínku. Vývoj tepla se značně zpomalí. V průběhu tohoto stádia se vytvoří malé množství CSH gelu. Pokud je v portlandském cementu správně vyvážen poměr mezi množstvím aluminátových fází a síranových iontů, vznikne také malé množství ettringitu. V průběhu indukční periody se záměsová voda stane nasyceným roztokem Ca^{2+} , přesto však nedochází k precipitaci portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pravděpodobně díky malé rychlosti tvorby krystalizačních zárodků v porovnání s konkurenční tvorbou CSH gelu. Do jisté míry také dochází k flokulaci zrn [2].

3. Počátek tuhnutí

Hydratace je na konci indukční periody aktivována snížením koncentrace Ca^{2+} iontů v roztoku precipitací portlanditu. Ta nastává v době, kdy v záměsové vodě již prakticky nejsou žádné aniony $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$. Náhlé snížení koncentrace Ca^{2+} a OH^- iontů opětovně nastartuje rozpouštění všech fází portlandského cementu. Vývoj tepla se zrychlí zpočátku mírně (protože precipitace portlanditu je endotermická reakce), později se rychlost vývoje tepla stále zvyšuje. Počátek tuhnutí většinou spadá do této doby zrychlení vývoje tepla, s výjimkou případů tuhnutí z důvodu tvorby jehličkovitých krystalů ettringitu, případně tvorby sádrovce. Hydratované silikátové a aluminátové fáze portlandského slínku začínají mezi částicemi vytvářet vazby, následkem čehož pasta tuhne [2].

4. Tvrdnutí

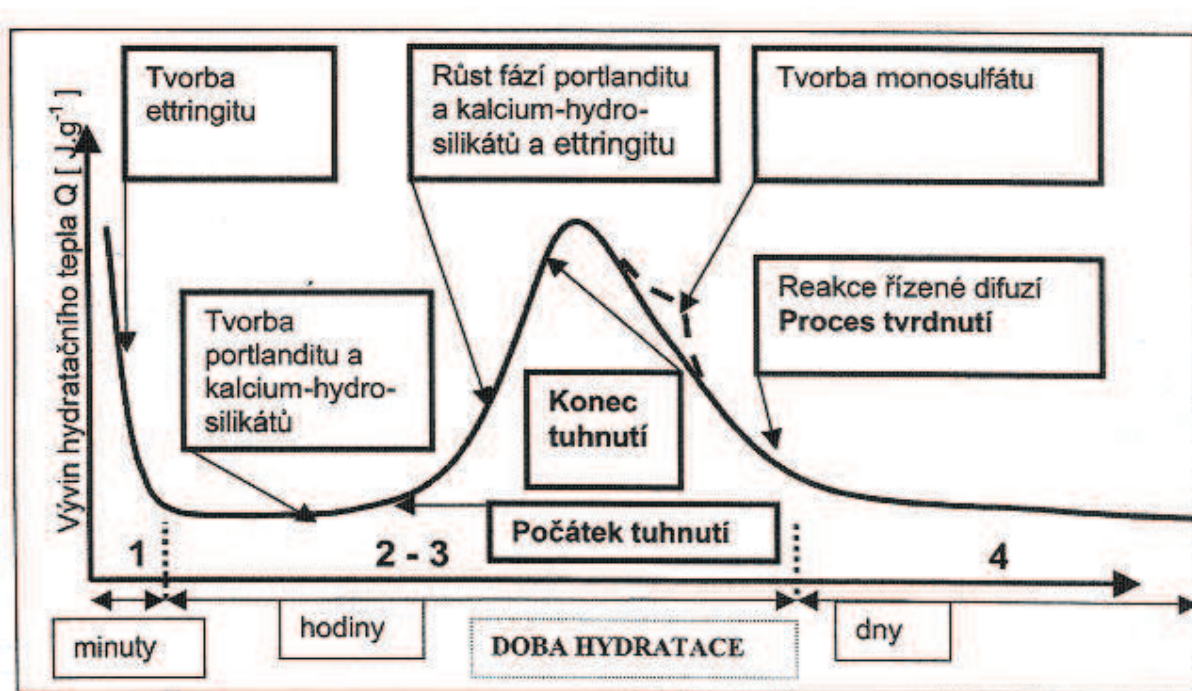
Většina portlandských cementů neobsahuje takové množství síranu vápenatého, které by bylo dostačující na reakci s veškerými aluminátovými fázemi portlandského slínku. V průběhu indukční periody dojde tvorbou ettringitu k vyčerpání SO_4^{2-} iontů. To se stane většinou po 9 až 15 hodin po smíchání cementu s vodou. Poté se ettringit stane nestabilní složkou a dojde k jeho rekrystalizaci za vzniku monosulfátu ($\text{C}_4\text{AS} \cdot \text{H}_{12}$). Díky reakci se v systému generuje další teplo a dochází k urychlení hydratace silikátových fází [2].

Hydratační produkty utvořené v průběhu prvních stadií jsou označovány jako „vnější produkt“, protože rostou ze zrn cementu ven, do mezer mezi nimi. Jedná se o porézní a volnou síť vláknitého CSH gelu, jehliček ettringitu, destiček monosulfátu a hexagonálních krystalků portlanditu [2].

5. Zpomalení hydratace

V tomto stadiu jsou zrna jednotlivých fází slínku pokryta vrstvou hydrátů, která je stále silnější. Molekuly vody obtížněji pronikají touto vrstvou k nezhydratovaným částicím slínku. Hydratace se zpomaluje, protože je z větší části kontrolována rychlostí difúze molekul vody vrstvou nově zformovaných hydrátů. Hydratovaná cementová pasta má vzhled kompaktní amorfni hmoty, kterou označujeme jako „vnitřní produkt“ [2].

Hydratace portlandského cementu je ukončena buďto ve chvíli, kdy již není v systému přítomna další nezhydratovaná fáze (dobře ošetřený beton o vysokém vodním součiniteli) nebo když voda již nemůže proniknout k nezhydratovaným částicím (velmi kompaktní systémy), případně když již není v systému k dispozici volná voda (při velmi nízkém vodním součiniteli) [2].



Obrázek 4: Vývin hydratačního tepla v průběhu hydratace portlandského cementu [7]

2.3 Superplastifikátory

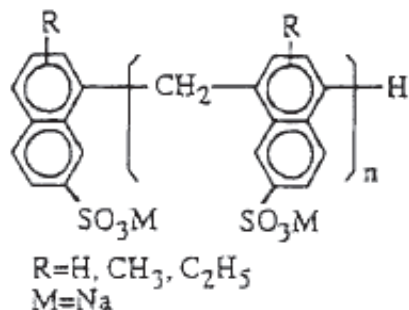
Nejvýznamnějším pokrokem v technologii betonu v posledních třech dekáдах je užívání superplastifikátorů. Jedná se o polymerní sloučeniny, které i přes velice nízké koncentrace (běžně 1 – 2 %), výrazně ovlivňují vlastnosti výsledného betonu. Jsou potenciálně tři hlavní možnosti užití superplastifikátorů [6, 8]:

1. Snížení vodního součinitele za účelem zvýšení pevnosti a odolnosti při zachování dané zpracovatelnosti.
2. Za účelem snížení celkového množství použitého cementu při zachování stejného vodního součinitele ku prospěchu menšího smrštění a snížení hydratačního tepla.
3. Zvýšení zpracovatelnosti při daném vodním součiniteli a pevnosti.

2.3.1 Typy superplastifikátorů

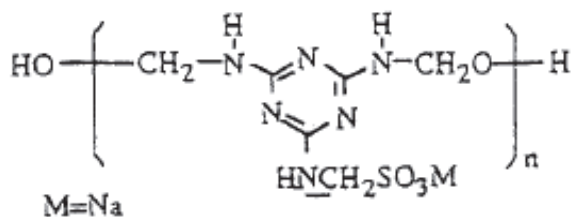
V současnosti se používají především tyto 4 skupiny superplastifikátorů [2, 6, 8]:

1. Naftalenové superplastifikátory - sulfonované soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydů.



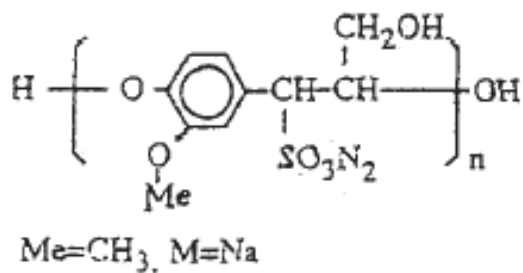
Obrázek 5: Příklad molekuly naftalenového superplastifikátoru [8]

2. Melaminové superplastifikátory – sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu.



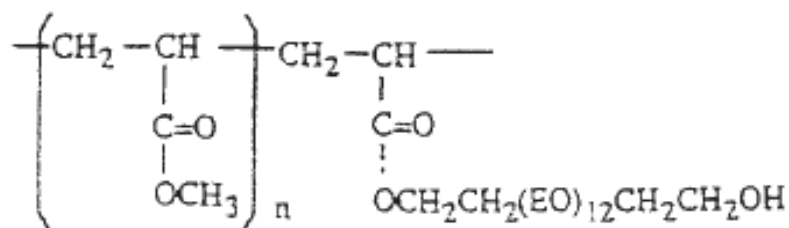
Obrázek 6: Příklad molekuly melaminového superplastifikátoru [8]

3. Lignosulfonátové superplastifikátory - lignosulfonáty s velmi nízkým obsahem sacharidů a povrchově aktivních činidel.



Obrázek 7: Příklad molekuly lignosulfátového superplastifikátoru [8]

4. Polykarboxyláty – superplastifikátory akrylátového typu.



Obrázek 8: Příklad molekuly akrylátového superplastifikátoru [8]

2.3.2 Mechanismus účinku superplastifikátorů

Superplastifikátory způsobují rozptýlení cementových částic do menších aglomerátů. Díky disperznímu efektu superplastifikátorů dochází k vzrůstu tekutosti betonové pasty. V minulosti byl disperzní efekt vysvětlován pomocí vzniku elektrostatického (negativního) náboje na povrchu částic cementu. Přitažlivé síly existující mezi částicemi cementu, které způsobují aglomeraci, by byly neutralizovány adsorpcí aniontových polymerů, jakými jsou sulfonované soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydů nebo sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu, díky přítomnosti SO_3^- skupin superplastifikátorů a jejich interakcí s povrchem cementových částic. Disperze cementových částic je poté způsobena elektrostatickým odpuzováním vznikajícím po adsorpci skupin se záporným nábojem [6, 8].

Nicméně experimentální výsledky nepotvrdili tento mechanismus pro polykarboxylátové superplastifikátory, z čehož plyne, že disperzní efekt zodpovědný za vzrůst tekutosti, nemá nutně spojitost pouze s elektrostatickým odpuzováním [6, 8].

Disperzní mechanismus polykarboxylátových superplastifikátorů je mnohem více způsoben sterickým odpuzováním, vznikajícím díky přítomnosti nerurálních dlouhých postranních řetězců, než přítomností negativní COO^- skupiny, která je zodpovědná za adsorpci polymeru na povrchu cementových částic. Jinými slovy, přítomnost dlouhých řetězců na povrchu cementových částic jim překáží ve flokulaci za tvorby velkých a nepravidelných aglomerátů [6, 8].

2.4 Kamenivo

Pevnost betonu je závislá především na pevnosti cementové malty a na její soudržnosti se zrny hrubého kameniva. Z hlediska materiálového je třeba beton chápat jako kompozitní materiál složený z relativně homogenních částí cementového kamene, jemných a hrubých částic kameniva. Při teoretických úvahách o pevnosti betonu je často používána dvoufázová představa o relativně homogenní cementové maltě (cement a písek), jenž obklopuje hrubé

části kameniva. Samotný cementový kámen má poměrně heterogenní charakter pórovité látky, jenž obsahuje vrstevnaté struktury CSH gelu, póry různých velikostí, částice nezhydratovaného slínku a další hydratované fáze [10].

Pevnost betonu závisí na pevnosti zatvrdlé cementové malty, pevnosti hrubých částic kameniva a na pevnosti rozhraní cementový kámen – kamenivo. Nejslabší částí struktury betonu je vazba cementového kamene a částic kameniva. Trhliny v tomto rozhraní začínají vždy dříve, než trhliny v cementovém kameni nebo v částicích kameniva. Vazba mezi cementovým kamenem a částicemi kameniva má charakter van der Waalsových sil. Na tuto vazbu působí řada faktorů, například charakter povrchu částic kameniva (u hrubých částic lze získat až o 30 % vyšších pevností ve srovnání s použitím hladkých částic) [10].

Tabulka 1: Rozdělení kameniva [1]

Znak	Rozdělení	Příklad
Objemová hmotnost	lehké (pórovité) do $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	keramzit, experlit
	hutné (2000 až $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) těžké nad $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	magnetit, baryt
Původ	těžené nebo drcené, přírodní nebo uměle recyklované	
Velikost zrn	zrna pod 0,063 mm	fíler
	jemné do 0,25 mm	moučka, fíler, příměs
	drobné od 0 do 4 mm	písek (0/4)
	hrubé od 4 do 63 mm	drť, štěrk (4/8, 8/16, 32/63)
	směs kameniva	štěrkopísek, štěrkodrt' (0/16, 0/32)
Frakce (dolní/horní velikost sít d/D)	úzká (když $D/d \leq 2$)	2/4, 4/8, 8/16, 16/32
	široká (když $D/d > 2$)	4/11, 8/32

Mikrokamenivo (jemné křemičité úlety, mikromletý vápenec nebo křemen, jemný elektrárenský popílek, metakaolin, bauxit, rutil, korund, žulový či čedičový prach) má významný podíl na pevnosti vysokohodnotného betonu. Některé z nich (méně reaktivní) působí převážně jako fíler, jiné uplatňují své hydraulické či pucolánové vlastnosti a produkty jejich hydratace spolupřispívají k tvorbě hutnou mikrostrukturu kompozitu [12].

Mikrokamenivo ovlivňuje růzností svého povrchu obsah vzduchu, působí příznivě na celkový objem i tvar pórů a tím i na zpracovatelnost čerstvé betonové směsi. Přítomnost

mikrokameniva výrazně ovlivňuje vlastnosti kontaktní (tranzitní) zóny. Je také známo, že čím menší částice kameniva, tím více vody je potřeba na adsorpci a tím se také zvyšuje celkový vodní součinitel směsi, což v konečném důsledku vede ke snížení hodnot výsledných pevností [11].

Drobné kamenivo pro výrobu vysokohodnotných betonů má obvykle zrnitost v rozsahu mezi doporučených pro běžné betony. Pokud je to ale možné, je vhodné použít drobné kamenivo odpovídající horní hranici zrnitosti. Použití hrubšího písku je opodstatněno skutečností, že vysokohodnotné betony mají vysoký obsah cementu a příměsí, takže není nezbytné užívat jemnější písek z důvodu lepší zpracovatelnosti a nižší segregace. Kromě toho se použití hrubšího písku odrazí v menší spotřebě vody, nezbytné pro danou zpracovatelnost, což je výhodné z hlediska pevnosti i hospodárnosti [2].

S růstem tlakové pevnosti se stává výběr hrubého kameniva důležitějším. Pro výrobu vysokohodnotného betonu byla úspěšně použita drcená tvrdá a kompaktní kameniva, jako vápenec a přeměněné horniny plutonického typu (žula, syenit, gabro, diorit a diabas). Tvar zrn hrubého kameniva je důležitý zejména z důvodu reologie. Je třeba, aby během drcení vznikala spíše kulovitá nebo kubická zrna, nikoli zrna tvaru destiček nebo tyčinek. Ta bývají málo pevná a snadno se lámou. Směsi z nich bývají špatně zpracovatelné, pro dosažení požadované konzistence je třeba přidat více vody. Z hlediska pevností jsou za nejlepší kameniva pro vysokohodnotný beton považována těžená kameniva glaciálního a fluvioglaciálního původu, ty však nejsou běžně nalézány. Výběr hrubého kameniva musí být proveden po jeho pečlivém studiu. Je třeba se ujistit, že všechna zrna jsou dostatečně pevná, aby nedošlo k předčasnému porušení vysokohodnotného betonu [2].

V běžné betonářské praxi může být dosaženo určité redukce vodního součinitele prostřednictvím zvětšení maximální velikosti zrn kameniva ($D_{\max}$). Ovšem v technologii vysokohodnotného betonu nemusí být přírůstek pevnosti, plynoucí ze zvýšení $D_{\max}$, dostatečný k tomu, aby vyrovnal ztráty plynoucí z opačných účinků. Zprv se zvýšením $D_{\max}$ se zóna rozhraní stává heterogennější a rozsáhlejší, zadruhé, pro většinu hornin jsou menší zrna pevnější, než zrna větší. Je tomu tak proto, že snížení velikosti často eliminuje vnitřní defekty zrn, jako jsou například póry, mikrotrhliny a inkluze měkkých materiálů. Zkušenosti ukazují, že je obtížné vyrábět vysokohodnotné betony s kamenivem s $D_{\max}$ větším než 25 mm. Pro většinu přírodních kameniv je pro výrobu vysokohodnotných betonů bez další optimalizace nejbezpečnější $D_{\max}$ 10 až 12 mm [2].

2.5 Faktory ovlivňující pevnost betonu

2.5.1 Alkalicko-křemičitá reakce

Alkalicko-křemičitou reakcí je myšlen sled složitých a komplexních reakcí mezi částicemi reaktivního amorfního oxidu křemičitého a alkalickými roztoky přítomnými v betonu, následkem čehož je vznik alkalicko-křemičitého gelu v mikropórech betonu. Tato reakce je spojena s objemovou expanzí. Protože je kamenivo v matici malty pevně usazeno, není k dispozici prostor pro expanzi. Objemový nárůst tak vede ke vzniku vnitřního tlaku. Toto namáhání přesahuje pevnost v tahu přijatelnou pro beton, takže mohou velice snadno vznikat trhliny. Tyto trhliny jsou většinou jemně rozloženy a jsou síťovité. Nejsou omezeny pouze na viditelnou okrajovou oblast, nýbrž se mohou táhnout celou betonovou strukturou. Alkalicko-křemičitá reakce probíhají během delšího časového období. Alkálie prosakují z uvolněných pórů postupně také již vytvořenou vrstvou gelu a dále reagují s amorfním oxidem křemičitým v jádru kameniva. Současně se mohou z gelu znovu uvolňovat alkalické hydroxidy, které jsou rovněž k dispozici pro pokračování reakce [21, 22].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité suroviny

Portlandský cement: CEM I 42,5 R-Sc Mokrý

Destilovaná voda

Kamenivo:

- Suk (speciálně umletý křemičitý písek)
- Kalcinovaný bauxit (frakce 0 – 1 mm)
- Zkušební písek jemný ČSN EN 196-1
- Zkušební písek střední ČSN EN 196-1
- Zkušební písek hrubý ČSN EN 196-1

Superplastifikátor: Glenium Ace 40 (polykarboxyether)

3.2 Použité přístroje a zařízení

- Laserový analyzátor velikosti částic SYMPATEC HELOS KR
- Hydraulický lis pro mechanické testování BETONSYSTEM DESTTEST 3310
- Vícemístný isoperibolický kalorimetr
- Rentgenový fluorescenční spektrometr XENOMETRICS EX-6600 SSD

3.3 Popis použitých metod

3.3.1 Laserová analýza velikosti částic

Pro analýzu velikosti částic práškových vzorků se využívá laserová difrakce. Je možno měřit vzorky s rozsahem velikosti částic mezi $0,1 - 3\,000\ \mu\text{m}$. Vzorek je možno dispergovat suchým i mokrým způsobem [18].

Analýza velikosti částic pomocí laserové difrakce je založena na principu, že částice dané velikosti způsobují difrakci světla pod daným úhlem. Čím je částice menší, tím se zvyšuje difrakční úhel, ale zároveň klesá intenzita záření. Paralelní paprsek monochromatického světla prochází kyvetou se suspenzí a difraktované světlo dopadá na fotodetektor. Detektor snímá úhlové rozložení intenzity rozptýleného světla. Množství světla naměřeného v různých úhlech se následně využije výpočtu distribuce velikosti částic [19].

Laserová difrakce je ensemblová metoda, což znamená, že je velký počet částic osvětlen současně a difrakční obraz snímáný fotodetektorem představuje superpozici interferenčních obrazů jednotlivých částic. Koncentrace částic v suspenzi musí být dostatečně nízká, aby nedošlo k překryvu částic a k zabránění mnohonásobnému rozptylu. Na druhé straně, koncentrace musí být dostatečně vysoká k docílení rozumného poměru signálu k šumu [20].



Obrázek 9: Laserový analyzátor velikosti částic [18]

3.3.2 Mechanické vlastnosti

Pevnost betonu je dána největší hodnotou napětí betonu zjištěnou při jeho porušení. Vyjadřuje tedy schopnost betonu odolávat účinku vnějších sil, aniž by došlo úplnému porušení zkušebního tělesa. Kompozity na bázi portlandského cementu se většinou chovají jako materiály křehké. To znamená, že se na rozdíl od kovu až do svého porušení deformují pouze pružně a tedy plastická deformace je zanedbatelná. Obecně lze pružnou deformaci křehkého tělesa v celém rozsahu pevnosti, například při namáhání v tahu, vyjádřit Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

kde: σ – působící napětí [Pa]

E – Youngův modul pružnosti v tahu [Pa]

ε – relativní deformace

Po překročení mezního napětí se těleso z křehkého materiálu náhle poruší tzv. křehkým lomem [5, 13].

Pevnost v tlaku

Pevnost betonu je nejdůležitější konstrukční vlastností a lze ji definovat jako schopnost betonu vzdorovat vzniklým napětím. Je vyjadřována jako hodnota mezního napětí v betonu při porušení celkové soudržnosti jednotlivých fází ve vzorku, v prvku nebo v konstrukci [5, 13].

Pevnost v tahu za ohybu

Principem zkoušky je stanovení napětí, při kterém dojde k porušení zkušebního tělesa v prostém tahu. Je dáno poměrem největší dosažené síly a velikosti tažného průřezu tělesa. Těleso se umístí na válečky a je namáháno ve třech bodech [5, 13].

U vzorků byla stanovována pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu pomocí hydraulického lisu pro mechanické testování BETONSYSTEM DESTTEST 3310. Stanovení se řídí normou ČSN EN 196-1. Pevnosti byly měřeny po 1, 7 a 28 dnech.

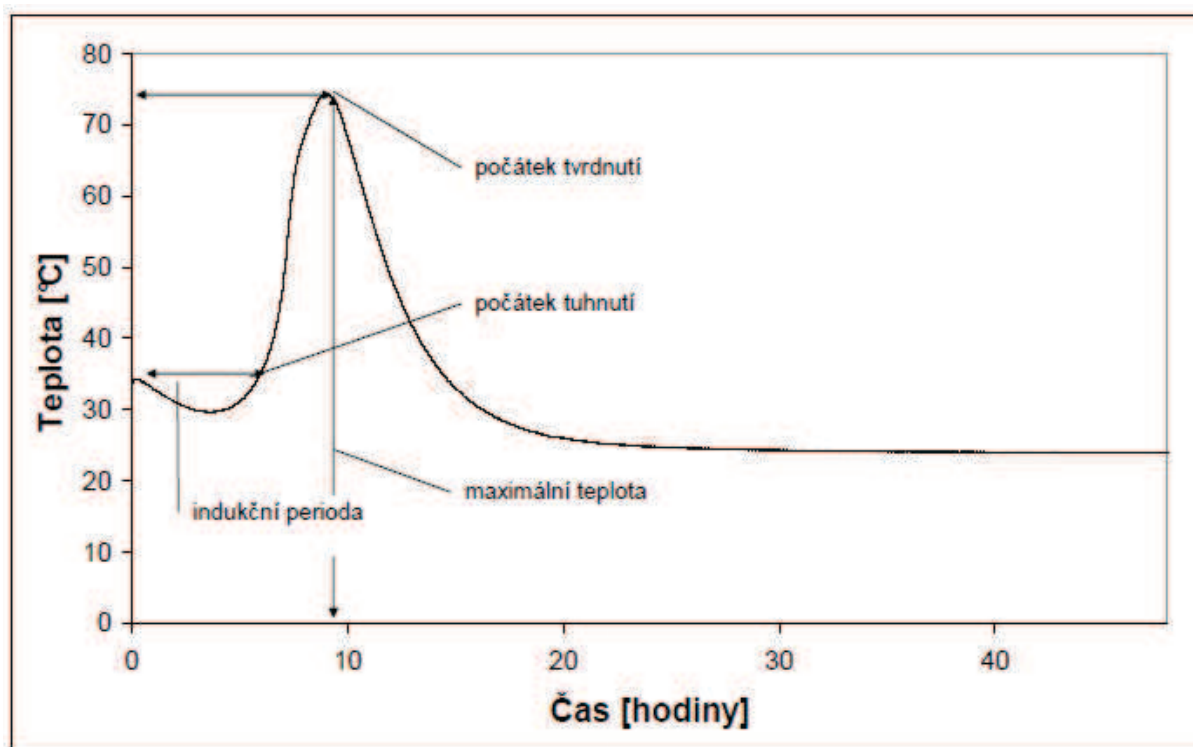


Obrázek 10: Hydraulický lis pro mechanické testování BETONSYSTEM DESTTEST 3310 [18]

3.3.3 Isoperibolická kalorimetrie

Velmi dobré a reprezentativní výsledky při měření hydratačního procesu se dají získat použitím vícemístného isoperibolického kalorimetru. Tato jednoduchá metoda umožňuje současné měření procesu hydratace několika vzorků najednou a zároveň umožňuje určení začátku tvrdnutí. Takto je možno sledovat vliv složení a množství jednotlivých komponent směsi cementové pasty [15, 16].

Z naměřených dat hydratační křivky lze stanovit maximální teplotu, což je nejvyšší naměřená teplota v průběhu hydratace. Počátek tvrdnutí je čas dosažení maximální teploty. Indukční periodu lze popsat jako čas od přidání vody do počátku maxima druhého píku hydratační křivky. Počátek tuhnutí je čas, který odpovídá času počátku maxima druhého píku hydratační křivky [15, 16].

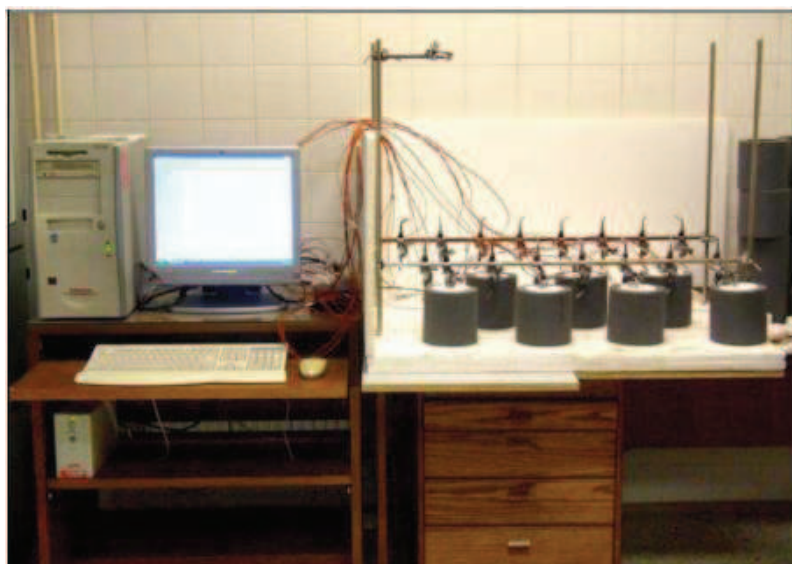


Obrázek 11: Vyhodnocení kalorimetrické křivky [5]

Pro měření se využívají 200 ml kelímky z pěnového polystyrenu s dostatečným množstvím vzorku (obvykle 300 g). Ty se poté vloží do termoizolačního obalu, který je poté volně umístěn v laboratoři. Následně je do vzorku zavedeno teplotní čidlo, které je napojeno na počítač zaznamenávající teplotu uvnitř vzorku v pravidelných časových intervalech. Kalorimetr je vhodné situovat ve stíněné laboratoři s konstantní teplotou [17].

Nejpodstatnější částí kalorimetru je termoizolační obal, který zabraňuje výměně tepla hydratujícího vzorku s okolím. Adiabatická kalorimetrie simuluje chování tvrdnoucího betonu uvnitř masivního bloku, zatímco isoperibolické měření prováděné bez jakékoliv izolace nádoby simuluje podmínky na povrchu bloku [17].

Velkou výhodou isoperibolického kalorimetru je velice jednoduchá konstrukce, která nevyžaduje žádnou speciální údržbu. Srdcem celého přístroje je měřicí karta, jež spojuje teplotní čidla s počítačem [17].



Obrázek 12: Vícemístný isoperibolický kalorimetr a detail termoizolačního obalu [14]

3.3.4 Rentgenová fluorescenční spektrometrie

Rentgenová fluorescenční spektrometrie je jednoduchá analytická metoda sloužící k prvkové kvalitativní i kvantitativní analýze složení vzorku. Principem metody je interakce rentgenového záření, které emituje rentgenka, se vzorkem. Při této interakci dochází k vyražení elektronu z vnitřních slupek atomu zkoumané látky. Následně dojde k přesunu elektronu z vyšších energetických hladin a vyzáření sekundárního rentgenového záření, které je charakteristické pro všechny prvky. Toto záření je poté detekováno na detektoru. Fluorescenční spektrometry dělíme na dva základní typy - vlnově dispersní a energiově dispersní. Zatímco u vlnově dispersních spektrometrů dochází k separaci rentgenového záření na krystalu na základě různých vlnových délek, u energiově disperzních spektrometrů dochází k detekci na základě různých energií fotonů sekundárního rentgenového záření [23].



Obrázek 13: Rentgenový fluorescenční spektrometr XENOMETRICS EX-6600 SSD [18]

3.4 Příprava vzorků

Byly připravovány zkušební trámečky ze směsi cementu s kamenivem v hmotnostním poměru 1:1 při různých vodních součinitelích. Směsi obsahující jako kamenivo suk, kalcinovaný bauxit a jemný písek se připravovaly plněním ocelových forem o rozměrech 20x20x100 mm. Směsi se středním a hrubým pískem se připravovaly ve formách o rozměrech 40x40x160 mm.

Směs na přípravu trámečků se připravovala nejprve mícháním cementu s vodou po dobu jedné minuty. Následně bylo míchání přerušeno, pomocí stěrky bylo očištěno míchadlo a stěny míchací nádoby a bylo přidáno kamenivo. Potom byla směs míchána opět jednu minutu. Následovalo zvýšení otáček míchadla a směs se intenzivně domíchala opět po dobu jedné minuty.

Připravená pasta byla naplněna do forem, které se umístily na vibrační stůl po dobu jedné minuty. Pak byly zabaleny do polyethylenových pytlů po dobu jednoho dne. Poté se trámečky odformovaly a byly uloženy ve vlhkostní komoře při 20 °C, dokud nebyly použity na testy.

U vzorků, u kterých se zjišťovalo nejmenší množství vody potřebné k tvorbě pasty, byla vždy připravena směs s nižším w/c, než který odpovídal tvorbě pasty, stejným způsobem, jaký je popsán v předchozích řádcích. Následně byla přidávána voda po malých dávkách v pravidelných intervalech za stálého intenzivního míchání, dokud nedošlo k tvorbě pasty.

U vzorků se SP, u kterých se také zjišťovalo nejmenší množství vody potřebné pro vznik pasty, bylo vždy přidáno 1 % SP Glenium Ace 40 vzhledem k hmotnosti cementu, který byl předem rozmíchán v záměsové vodě. Vzorky byly připravovány obdobně s tím rozdílem, že se směs nechala 5 minut intenzivně míchat, aby se mohl účinek SP dostatečně projevit. Poté byla opět přidávána voda po malých dávkách, dokud nevznikla pasta. Hmotnost SP byla vždy při výpočtu w/c přičtena k hmotnosti vody.

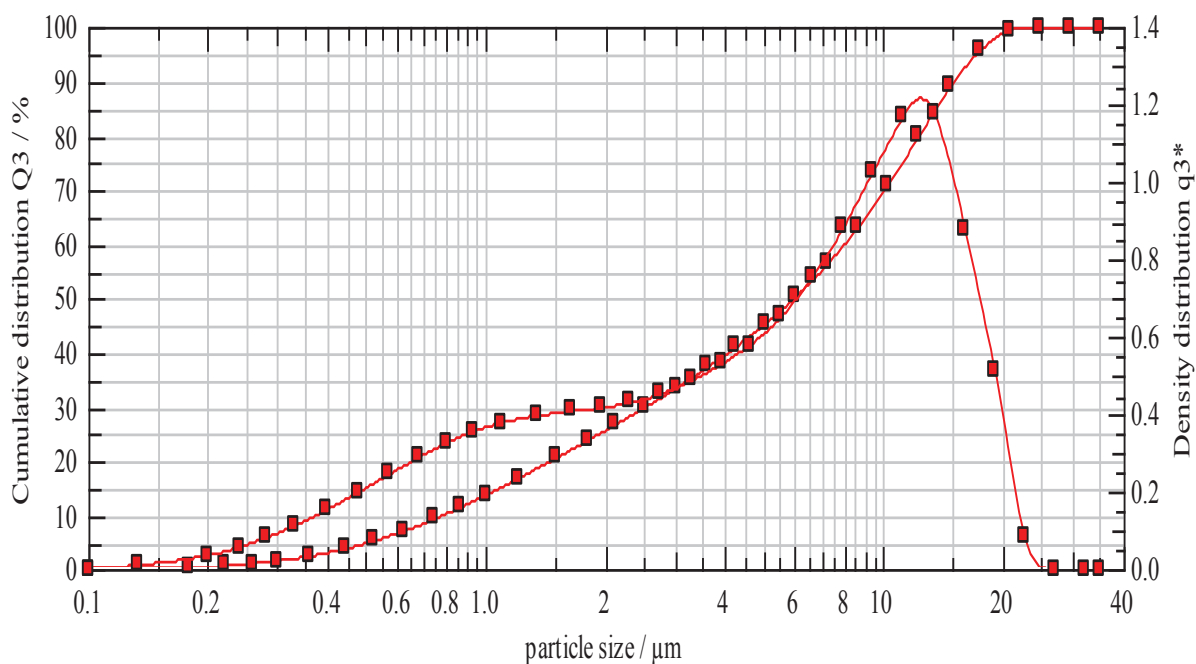
Z připravených past bylo vždy odebráno 300 g, které byly okamžitě umístěny na kalorimetr.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Laserová analýza velikosti částic

Suk

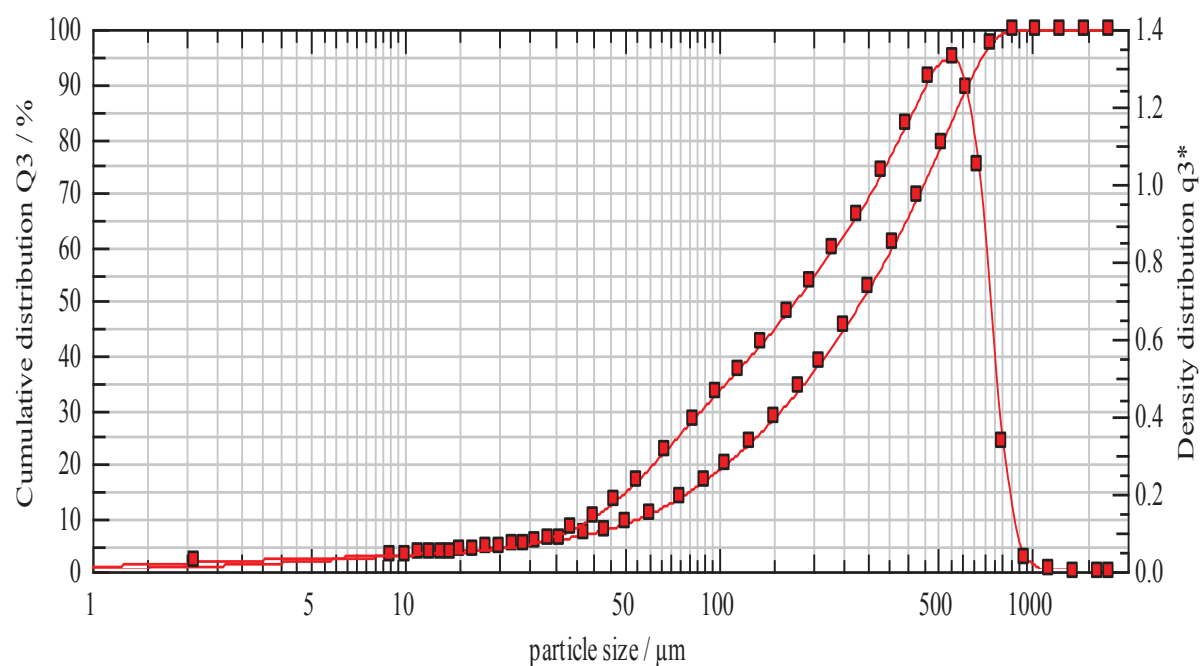
$$x_{50} = 5,87 \mu\text{m}$$



Graf 1: Analýza velikosti částic – suk

Kalcinovaný bauxit

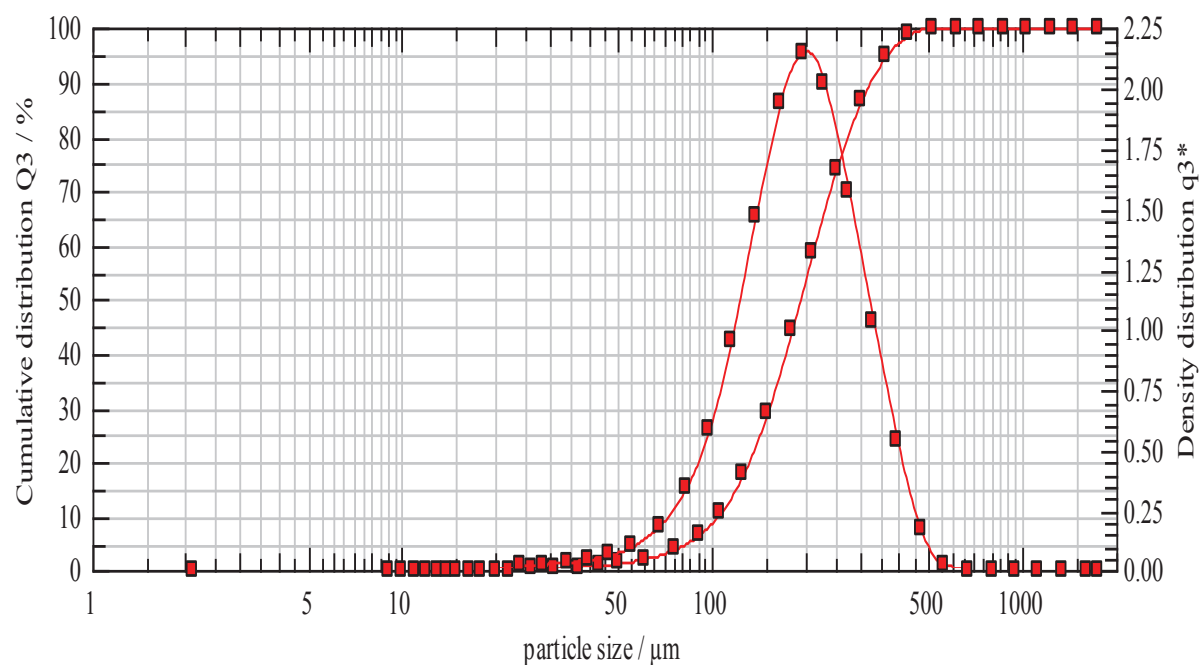
$x_{50} = 299,97 \mu\text{m}$



Graf 2: Analýza velikosti částic – kalcinovaný bauxit

Jemný písek

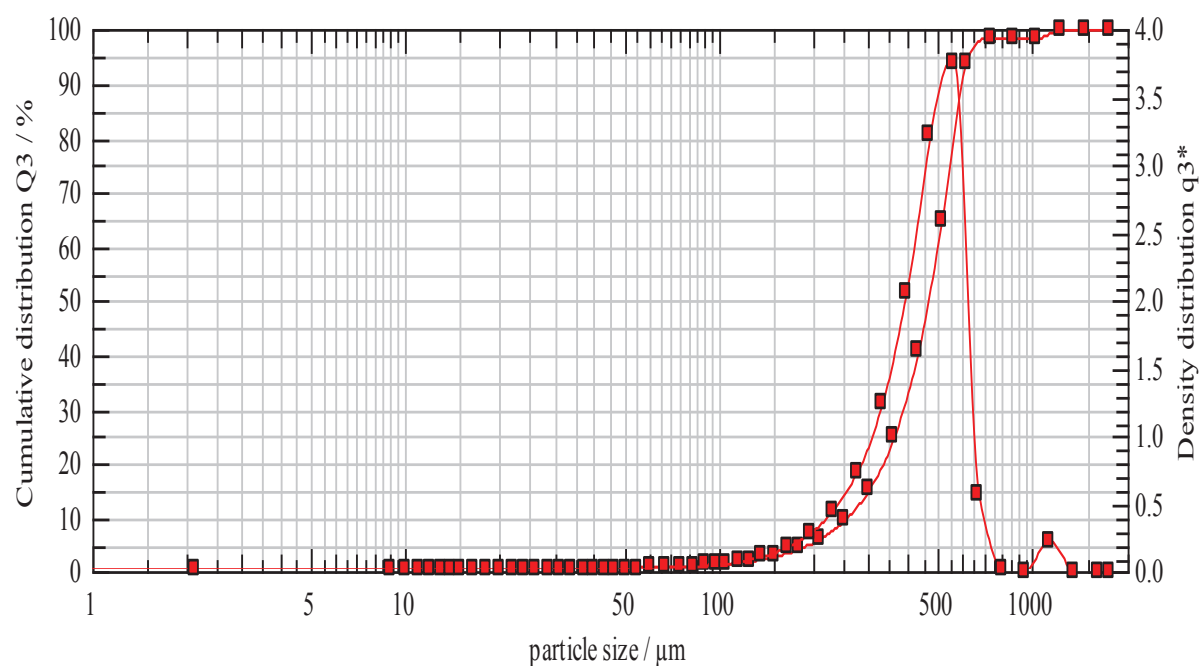
$x_{50} = 192,38 \mu\text{m}$



Graf 3: Analýza velikosti částic - jemný písek

Střední písek

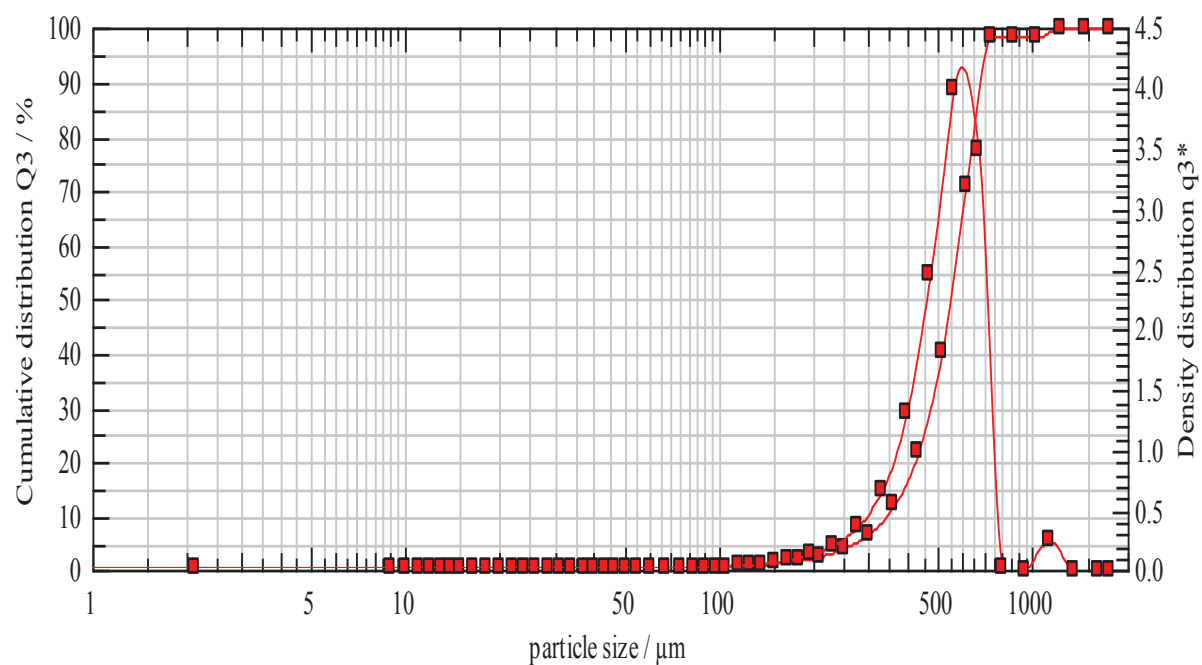
$x_{50} = 461,41 \mu\text{m}$



Graf 4: Analýza velikosti částic - střední písek

Hrubý písek

$x_{50} = 543,36 \mu\text{m}$



Graf 5: Analýza velikosti částic - hrubý písek

Podle naměřených dat můžeme seřadit použitá kameniva dle mediánu velikosti částic od nejmenšího po největší následovně: suk, jemný písek, kalcinovaný bauxit, střední písek, hrubý písek. Rozdíly ve velikosti částic jednotlivých kameniv jsou markantní a to se samozřejmě odrazilo na vlastnostech jednotlivých vzorků. Tyto vlastnosti jsou diskutovány v následujících kapitolách.

4.2 Mechanické vlastnosti

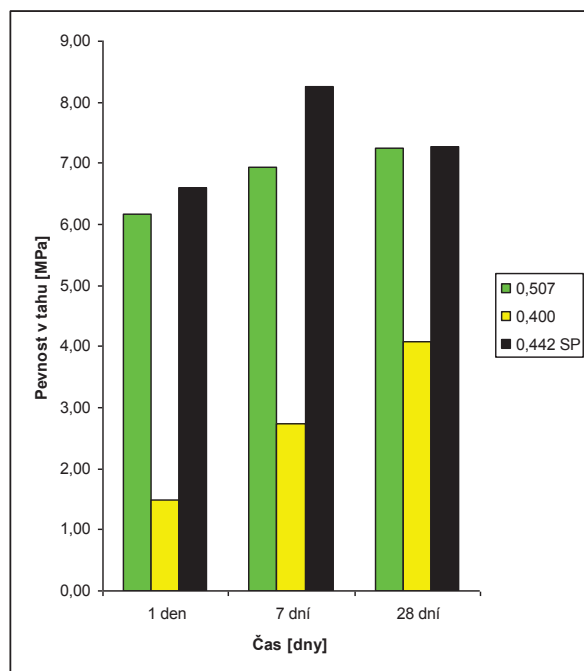
V této kapitole jsou shrnuty výsledky měření pevností v tahu za ohybu a v tlaku.

Tabulka 2: Srovnání pevností v tlaku a v tahu za ohybu

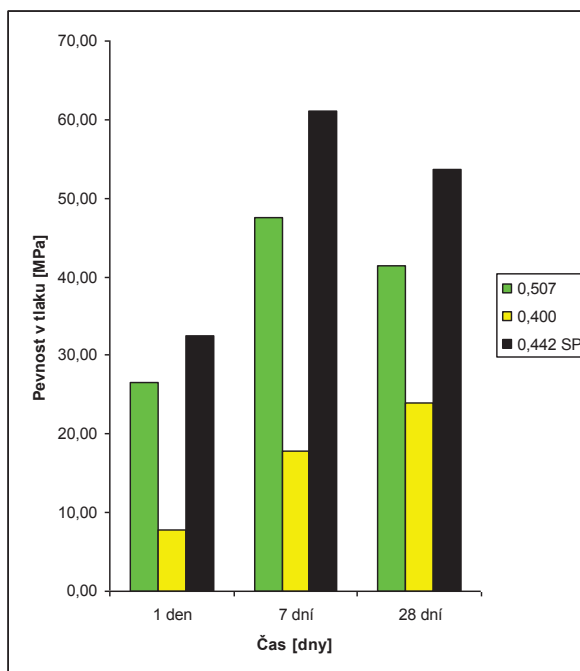
Použité kamenivo	w/c	Pevnost v tahu [MPa]			Pevnost v tlaku [MPa]		
		1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní
suk	0,400	1,48	2,73	4,07	7,72	17,90	23,86
kalcinovaný bauxit	0,400	6,21	9,00	9,03	27,24	76,38	68,68
jemný písek	0,400	5,55	7,13	6,76	25,58	64,36	58,39
střední písek	0,400	3,66	4,41	4,89	17,44	51,72	50,19
hrubý písek	0,400	2,85	4,07	4,44	15,22	52,97	46,79
kalcinovaný bauxit	0,360	7,09	9,89	11,50	41,11	81,93	79,05
jemný písek	0,360	6,35	8,53	8,84	34,94	71,55	71,43
střední písek	0,360	4,64	4,71	6,30	26,10	57,52	56,03
hrubý písek	0,360	4,37	4,88	5,46	26,60	59,69	53,60
kalcinovaný bauxit	0,300	8,15	10,44	12,66	52,16	90,89	77,14
jemný písek	0,300	4,44	7,97	8,19	37,02	57,53	54,07
střední písek	0,300	5,07	3,92	6,16	41,38	71,30	65,38
hrubý písek	0,300	4,35	3,87	6,81	36,93	68,51	63,57
kalcinovaný bauxit	0,250	4,87	8,12	7,27	38,59	66,79	55,38
jemný písek	0,250	2,68	3,73	3,16	19,78	30,56	25,72
střední písek	0,250	5,42	5,06	7,52	52,46	72,74	62,37
hrubý písek	0,250	4,15	6,72	6,37	53,94	70,01	61,52
kalcinovaný bauxit	0,200	2,87	4,20	5,31	27,31	34,17	31,53
střední písek	0,200	2,14	3,11	2,50	16,21	17,24	17,35
hrubý písek	0,200	2,75	3,24	2,61	19,25	21,02	18,62
suk	0,507	6,17	6,94	7,24	26,58	47,59	41,49
kalcinovaný bauxit	0,335	5,96	10,23	11,60	58,54	82,92	74,30
jemný písek	0,365	5,50	8,90	9,58	42,11	68,11	79,56
střední písek	0,289	4,11	5,93	6,84	41,80	69,45	71,18
hrubý písek	0,274	4,36	5,25	6,90	49,53	69,29	61,80
suk + 1 % SP	0,442	6,60	8,26	7,27	32,48	61,09	53,58
kalc. bauxit + 1 % SP	0,291	8,35	11,10	10,14	57,39	77,25	73,25
jemný písek + 1 % SP	0,325	6,74	9,07	7,47	43,39	66,46	60,75
střední písek + 1 % SP	0,237	7,04	7,48	10,18	62,61	87,06	94,34
hrubý písek + 1 % SP	0,224	7,53	6,36	8,89	68,24	91,73	79,98

4.2.1 Mechanické vlastnosti směsí jednotlivých kameniv

Suk



Graf 6: Pevnost v tahu směsí se sukem



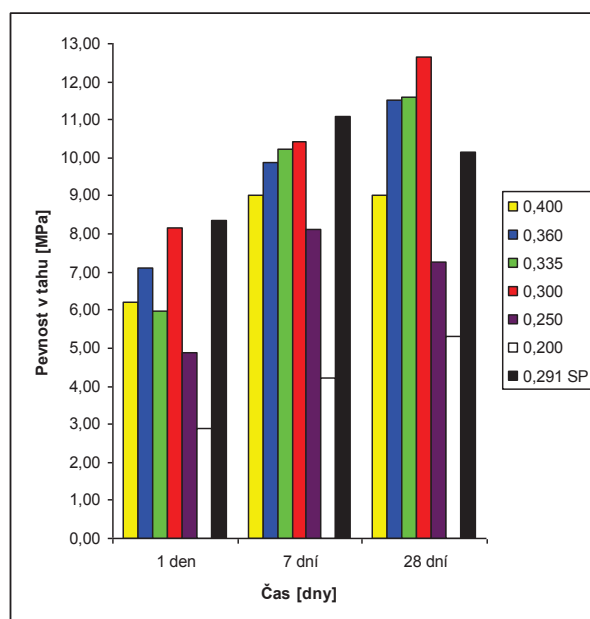
Graf 7: Pevnost v tlaku směsí se sukem

Jak vyplývá z výsledků analýzy velikosti částic, suk má z použitých kameniv nejmenší velikost částic a tudíž největší specifický povrch. Proto je potřeba dodat velké množství vody, aby vznikla pasta. Limitní w/c pro tvorbu pasty při použití suku je 0,507 bez použití SP a 0,442 s přidáním 1 % SP. Směs s w/c 0,400 byla již velmi suchá a netvořila kompaktní pastu.

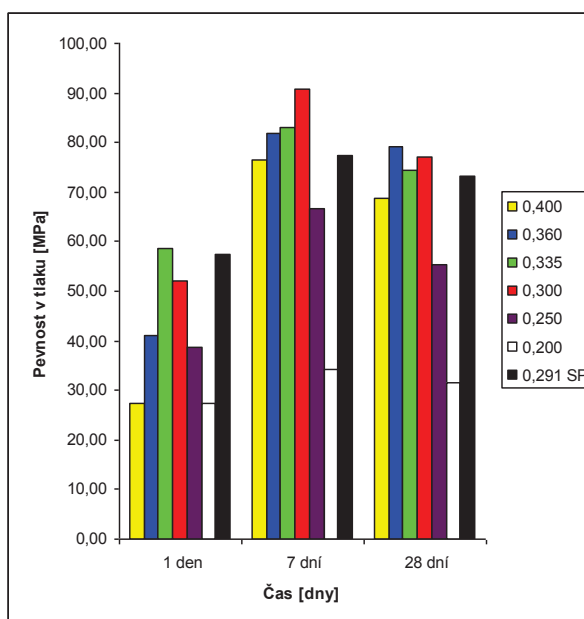
U vzorků pevnost v tahu za ohybu s časem lineárně roste s výjimkou vzorku s 1 % SP, kde dochází ke ztrátě pevnosti v tahu mezi 7. a 28. dnem. Snížení w/c vlivem použití 1 % SP se na pevnosti v tahu u vzorku projevuje mírně vyšší pevností po 1 a 7 dnech. Po 28 dnech je pevnost v tahu téměř shodná, jako u vzorku bez SP. U vzorku s w/c 0,400 můžeme sice pozorovat výraznější růst pevnosti s časem, nicméně vlivem nedostatku vody je mnohem nižší.

Pevnost v tlaku roste s časem pouze u vzorku s w/c 0,400. U ostatních je největší pevnost po 7 dnech a poté klesá. Snížení vodního součinitele pomocí 1 % SP se výrazněji projevilo celkově vyšší pevnosti v tlaku.

Kalcinovaný bauxit



Graf 8: Pevnost v tahu směsí s kalc. bauxitem



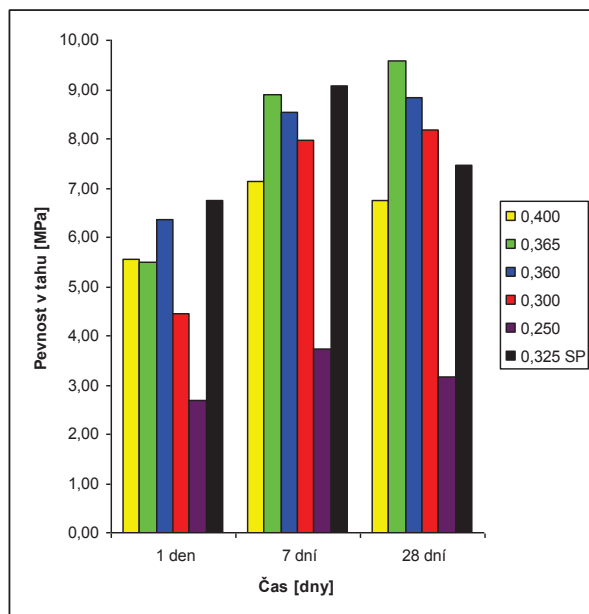
Graf 9: Pevnost v tlaku směsí s kalc. bauxitem

Vzhledem k velikosti částic kalcinovaného bauxitu se jedná, v rámci použitých kameniv, o středně hrubé kamenivo. Nejnižší w/c u směsí s bauxitem pro tvorbu pasty byl 0,335 bez SP a 0,291 s 1 % SP.

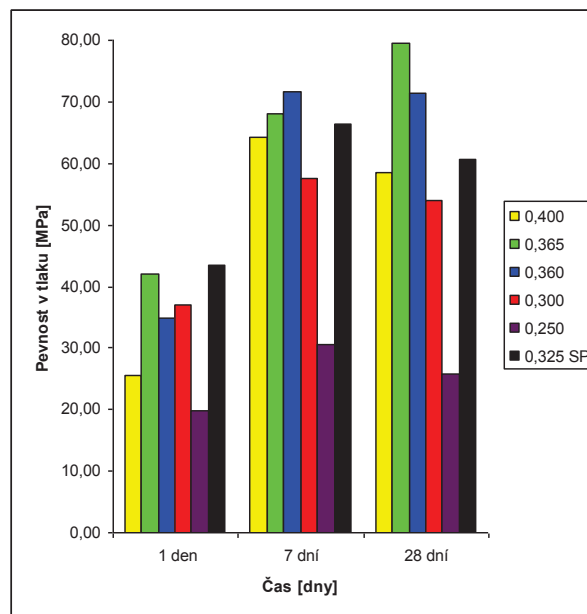
U směsí lze vypořádat růst pevností v tahu za ohybu s časem. Výjimky tvoří směs s w/c 0,250 a směs s 1 % SP, u kterých dochází k poklesu pevnosti v tahu mezi 7. a 28. dnem. Nejvyšší pevnost v tahu má směs s w/c 0,300. Snížení vodního součinitele vlivem použití 1 % SP se neprojevovalo na zvýšení pevnosti v tahu.

Všechny vzorky obsahující bauxit vykazují nejvyšší pevnost v tlaku 7. den. Ta následně mírně klesá. Po 1 dni má největší pevnost vzorek s w/c 0,335, po 7 dnech vzorek s w/c 0,300 a po 28 dnech vzorek s w/c 0,360. Pevnost vzorku s 1 % SP je i přes významné snížení vodního součinitele vždy o něco nižší, v porovnání s nejpevnějším vzorkem.

Jemný písek



Graf 10: Pevnost v tahu směsí s jemným pískem



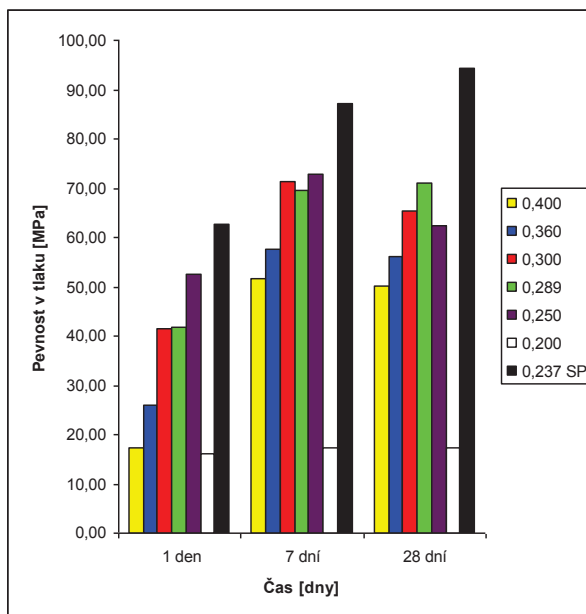
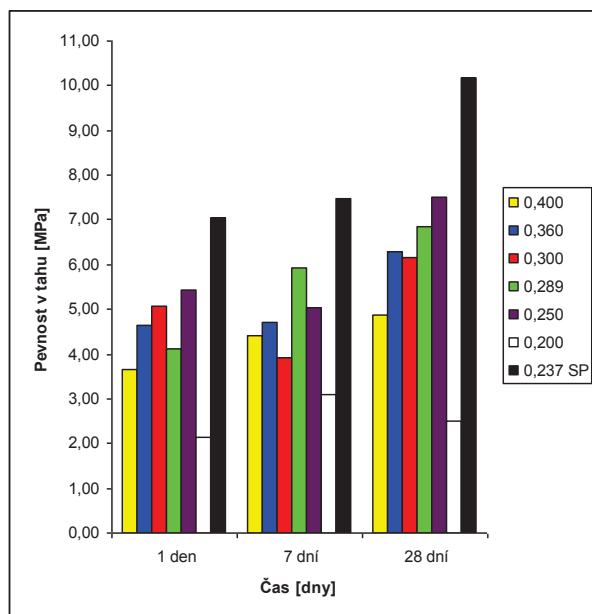
Graf 11: Pevnost v tlaku směsí s jemným pískem

Podle naměřených dat z granulometrie je jemný písek 2. nejjemnější kamenivo. Nejnižší w/c u směsí s jemným pískem pro tvorbu pasty byl 0,365 bez SP a 0,325 při použití 1 % SP.

Vzorky s w/c 0,400 a 0,250 a vzorek s 1 % SP mají největší pevnost v tahu za ohybu 7. den a ta následně klesá. U ostatních vzorků roste pevnost v tahu mezi 7. a 28. dnem pouze nepatrně. Po 1 dni má největší pevnost v tahu vzorek s w/c 0,360. Po 7 a 28 dnech má největší pevnost vzorek s w/c 0,365. Superplastifikovaný vzorek má největší pevnost po 7 dnech a následně dochází k výraznému poklesu. Užití 1 % SP opět umožňuje snížení w/c, ale nedochází ke zvýšení pevnosti v tahu.

Pevnost v tlaku je u všech vzorků, s výjimkou vzorku s w/c 0,365 u nějž pevnost v tlaku roste, nejvyšší 7. den a následně mírně klesá. První a 28. den má nejvyšší pevnost v tlaku vzorek s w/c 0,365, 7. den vzorek s w/c 0,360. Opět přidání 1 % SP a následné snížení w/c se neprojeví na zvýšení pevnosti v tlaku.

Střední písek



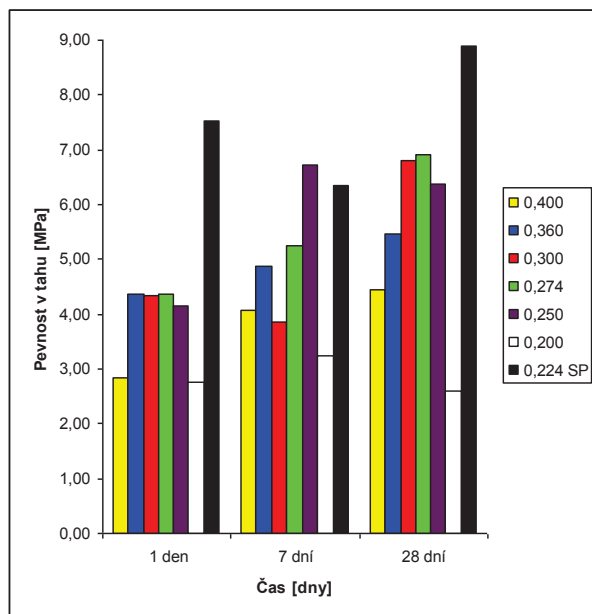
Graf 12: Pevnost v tahu směsí se středním pískem Graf 13: Pevnost v tlaku směsí se středním pískem

Nejnižší w/c pro tvorbu pasty je u směsí se středním pískem 0,289 bez SP a 0,237 s 1 % SP. V rámci použitých kameniv se jedná o 2. nejhrubší kamenivo.

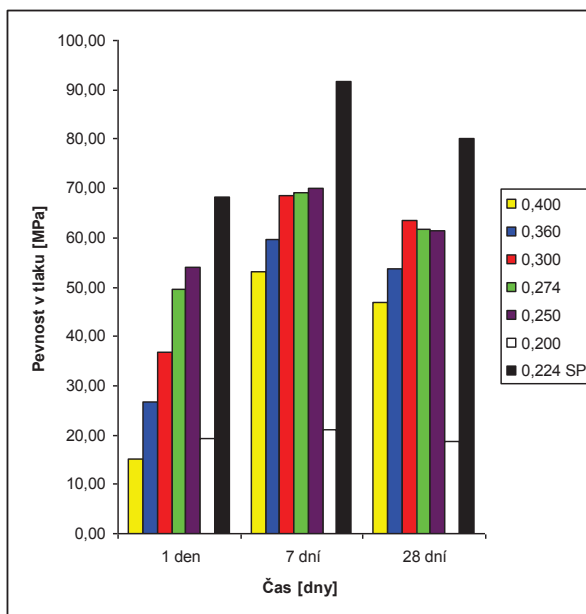
Pevnosti v tahu za ohybu u všech vzorků, s výjimkou vzorku s w/c 0,25, mezi 1. a 28. dnem rostou, u některých ale dochází ke snížení pevnosti po 7 dnech. Po 1 a 28 dnech má nejvyšší pevnost vzorek s w/c 0,250. Po 7 dnech má největší pevnost vzorek s w/c 0,289. Použití 1 % SP a následné snížení w/c se, při použití středního písku, významně projevilo a tento vzorek dosahoval vyšší pevnosti v tahu, než ostatní nesuperplastifikované vzorky.

Pevnost v tlaku u většiny vzorků roste mezi 1. a 7. dnem a následně mírně klesá. U vzorku s w/c 0,289 pevnost mezi 7. a 28. dnem mírně roste. Nejvyšší pevnosti v tlaku bylo dosaženo po 1 a 7 dnech u vzorku s w/c 0,250 a po 28 dnech u vzorku s w/c 0,289. U vzorku s 1 % SP dochází k výraznému růstu pevnosti s časem a navíc je jeho pevnost ve všech měřených dnech znatelně vyšší oproti vzorkům bez SP.

Hrubý písek



Graf 14: Pevnost v tahu směsí s hrubým pískem



Graf 15: Pevnost v tlaku směsí s hrubým pískem

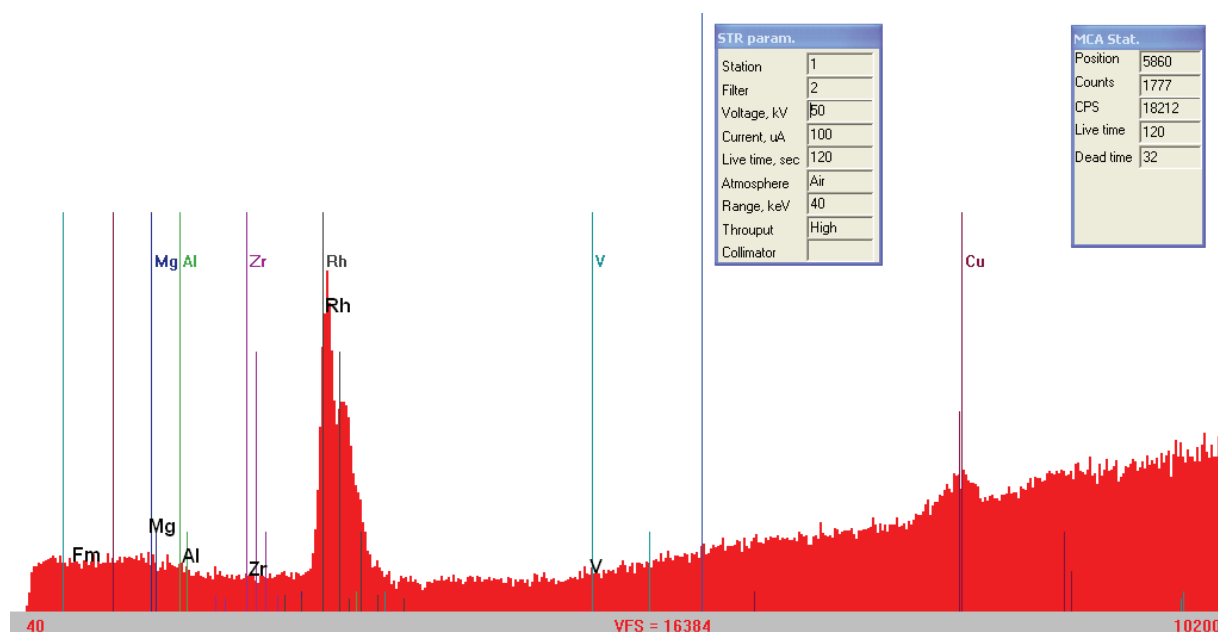
Nejnižší w/c pro tvorbu pasty je u směsí s hrubým pískem 0,274 bez SP a 0,224 se SP. Z použitých kameniv se jedná o kamenivo s nejhrubšími částicemi.

Pevnosti v tahu za ohybu mezi 1. a 28. dnem rostou u všech vzorků až na vzorky s w/c 0,250 a 0,200, které mají největší pevnost v tahu po 7 dnech. U vzorku s 1 % SP dochází po 7 dnech ke znatelnějšímu poklesu pevnosti v tahu, nicméně po 28 dnech je jeho pevnost výrazně vyšší, než u ostatních vzorků.

Pevnost v tlaku je u všech vzorků nejvyšší po 7 dnech a následně mírně klesá. Po 1 a 7 dnech má největší pevnost vzorek s w/c 0,250. Po 28 dnech je nejpevnější vzorek s w/c 0,300. Vzorek s 1 % SP vykazuje opět výrazně vyšší pevnost v tlaku oproti ostatním vzorkům.

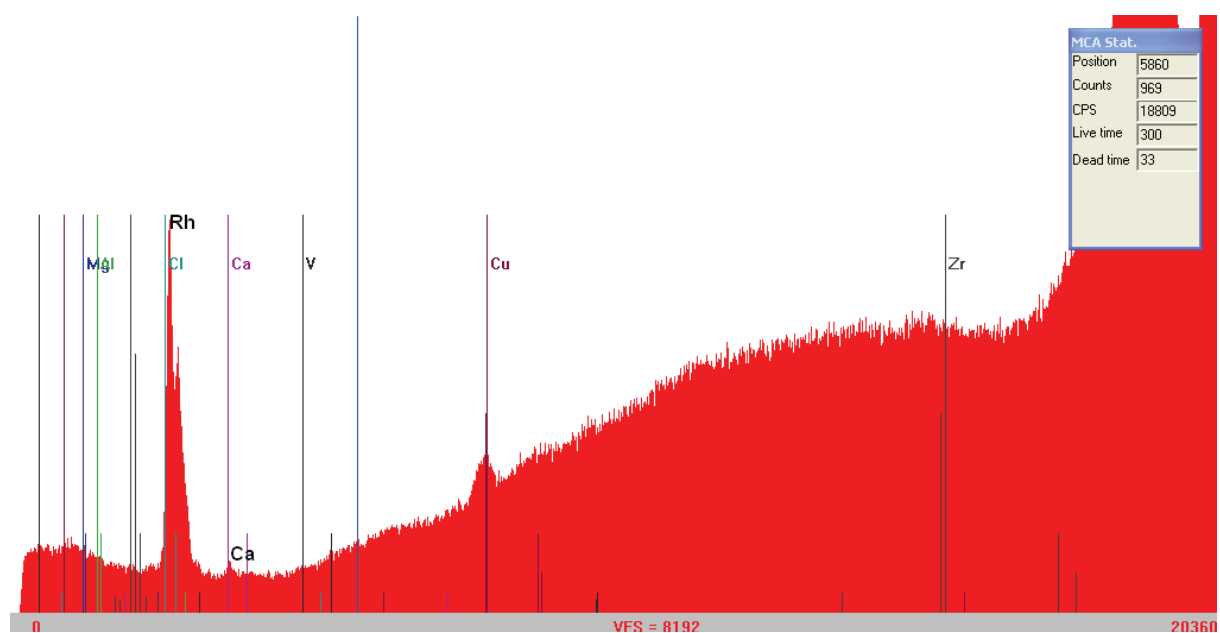
4.2.2 Orientační rozbor složení vody

Na základě často pozorovaného poklesu pevnosti mezi 7. a 28. dnem byl proveden orientační rozbor složení vody pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie. Při všech měřeních je patrný výrazný pík rhodia, který je způsoben výboji z rentgenky.



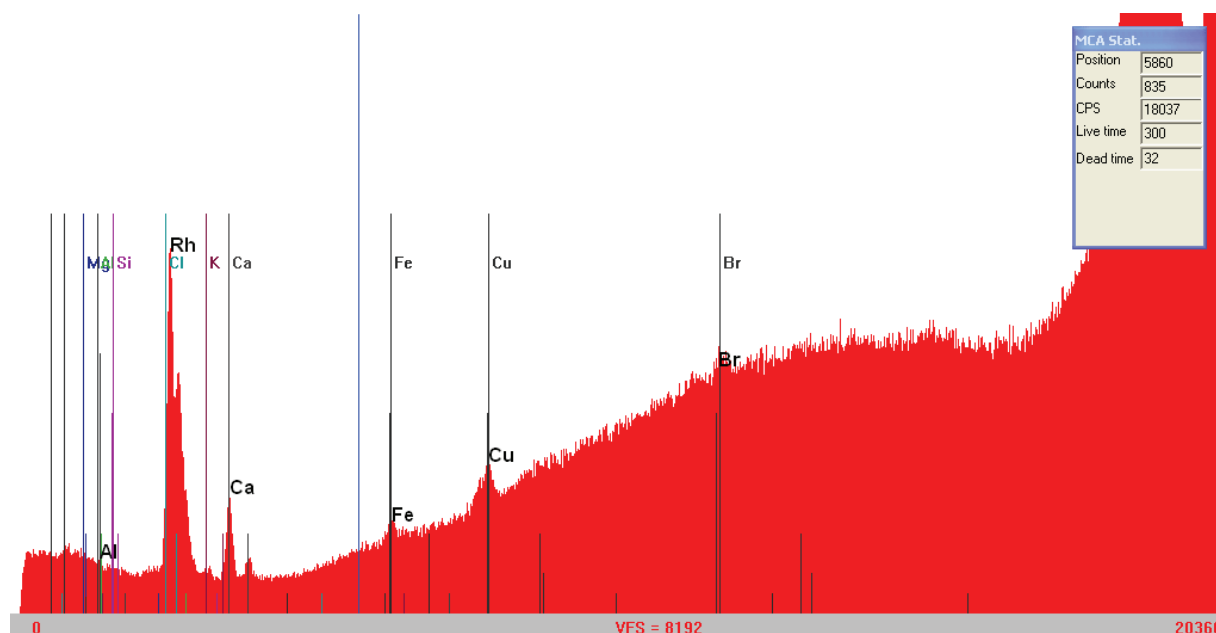
Graf 16: Prvkové zastoupení - destilovaná voda

Pro srovnání byla provedena analýza destilované vody. Zde lze pozorovat pouze velmi nízké koncentrace některých prvků.



Graf 17: Prvkové zastoupení - vodovodní voda

Při srovnání s destilovanou vodou již můžeme pozorovat přítomnost píků vápníku a chloru ve vodovodní vodě. Pík draslíku zde splývá s píkem rhodia.



Graf 18: Prvkové zastoupení - voda ve vaně vlhkostní komory

Ve složení vody ve vaně vlhkostní komory se nachází již identifikovatelný pík draslíku. Dále můžeme vidět výrazně vyšší koncentraci vápníku a dobře pozorovatelné a rozeznatelné píky železa a brómu.

Dále bylo provedeno měření pH vody vany vlhkostní komory, kdy byla naměřena hodnota 9,5.

Na základě těchto stanovení je možno předpokládat, že došlo ke kontaminaci vody a celého prostředí díky uskladnění jiných, alkalických vzorků. Toto alkalické prostředí mohlo nepříznivě ovlivnit vývoj pevností u měřených vzorků.

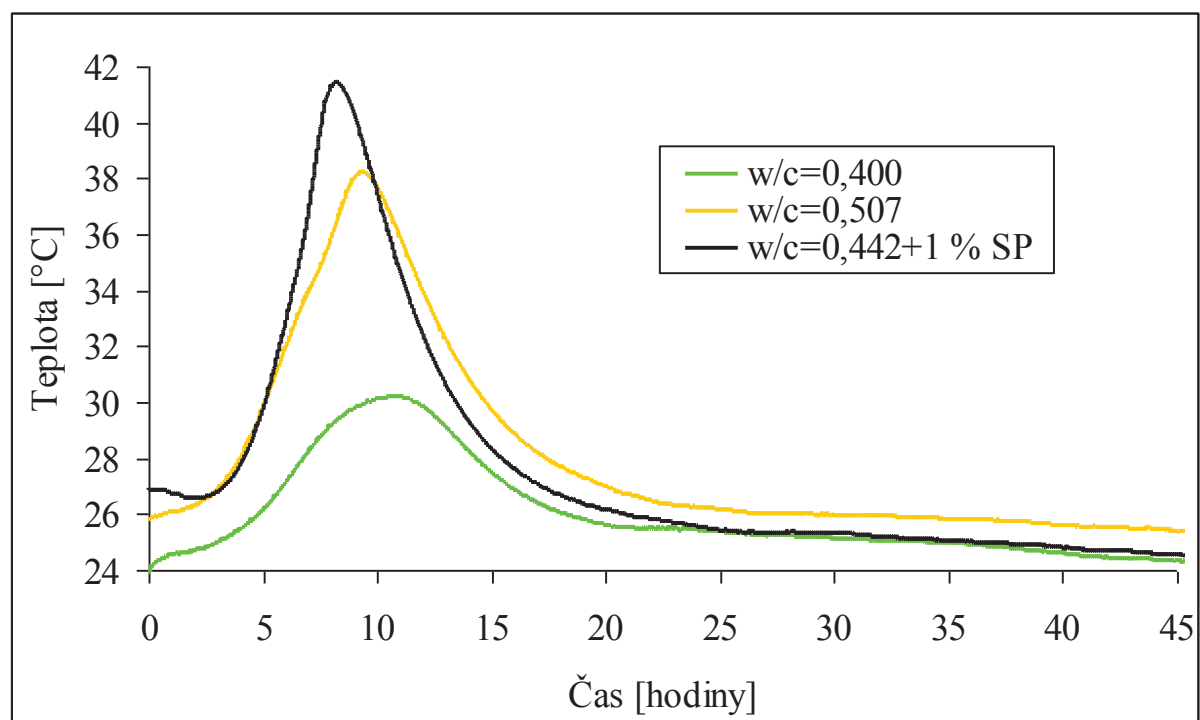
4.3 Isoperibolická kalorimetrie

V této kapitole jsou shrnuty výsledky kalorimetrických měření jednotlivých směsí. Standardně probíhá kalorimetrické měření po dobu 48 hodin. Občas se bohužel vyskytly problémy s měřicím zařízením a měření muselo být ukončeno předčasně. Žádné z měření ale nebylo kratší než 45 hodin a po této době se již dá předpokládat lineární průběh a proto jsou všechny výsledky prezentovány jako 45 hodinové měření.

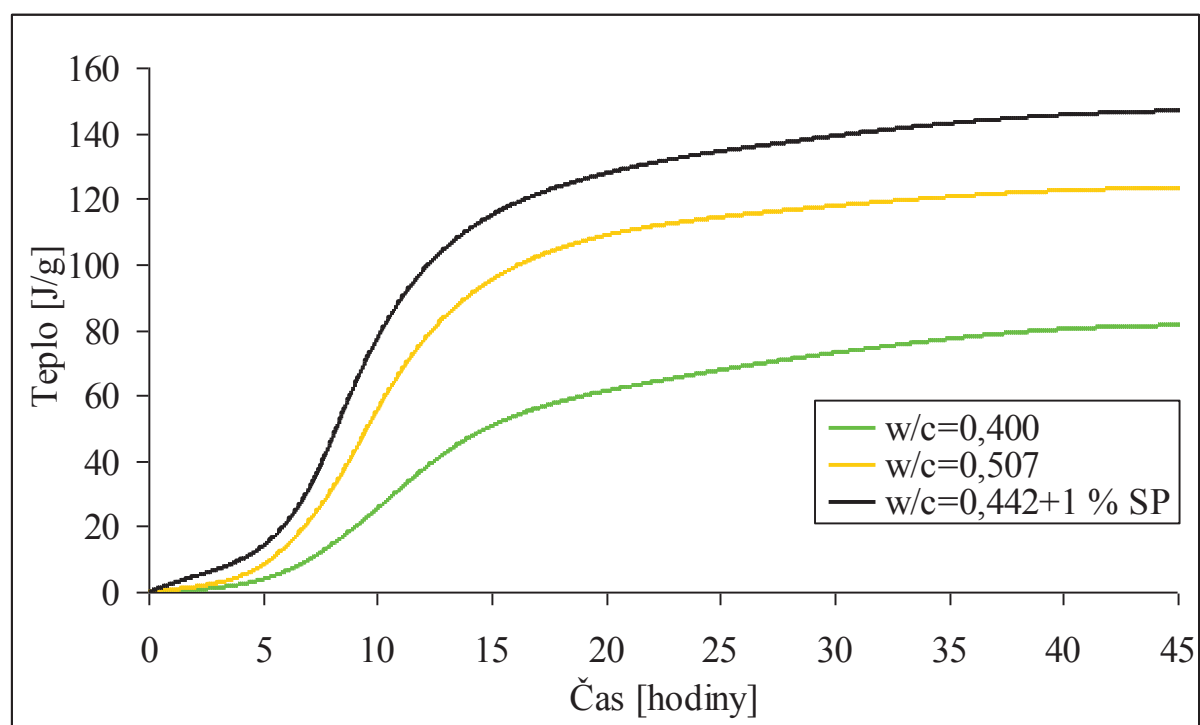
U některých měření lze pozorovat vznik „třetího píku“ v oblasti, kde by měl být průběh lineární. Tato anomálie vzniká z důvodu použití jiných přístrojů v laboratoři, které uvolňují velké množství tepla a proto dochází ke vzrůstu teploty v laboratoři a ovlivnění měření.

3.1 Kalorimetrie směsí jednotlivých kameniv

Suk



Graf 19: Hydratační křivka – suk

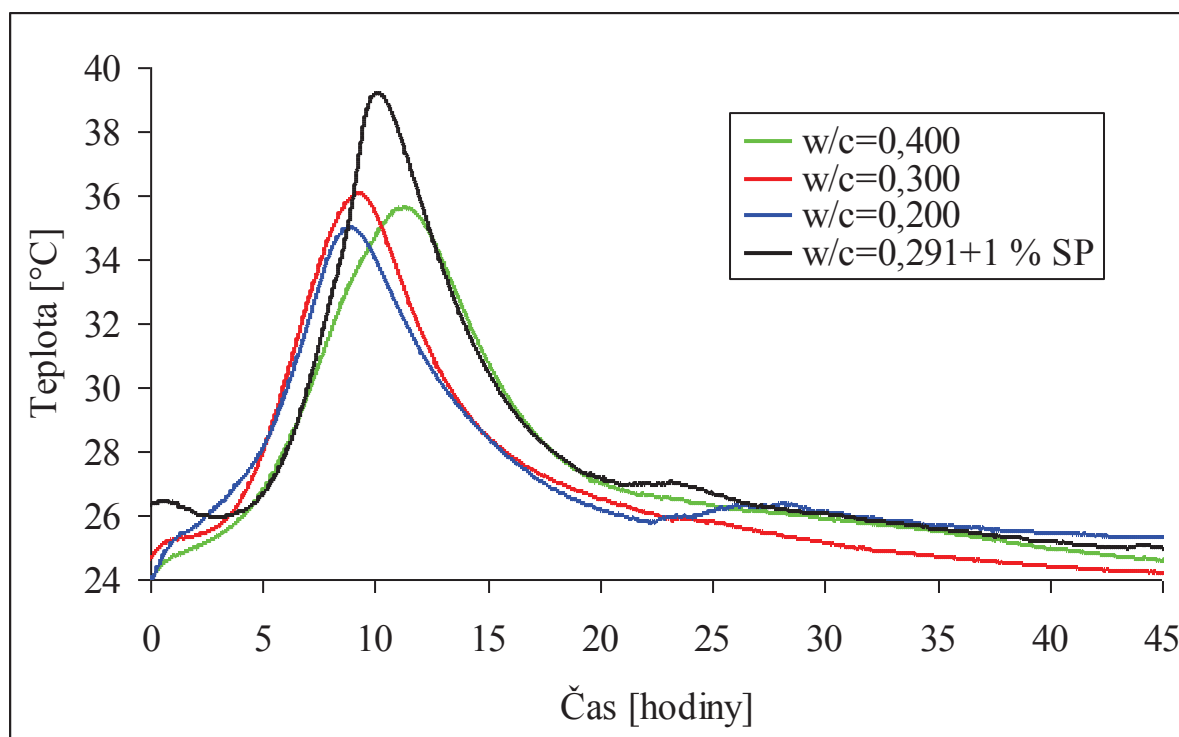


Graf 20: Integrální křivka – suk

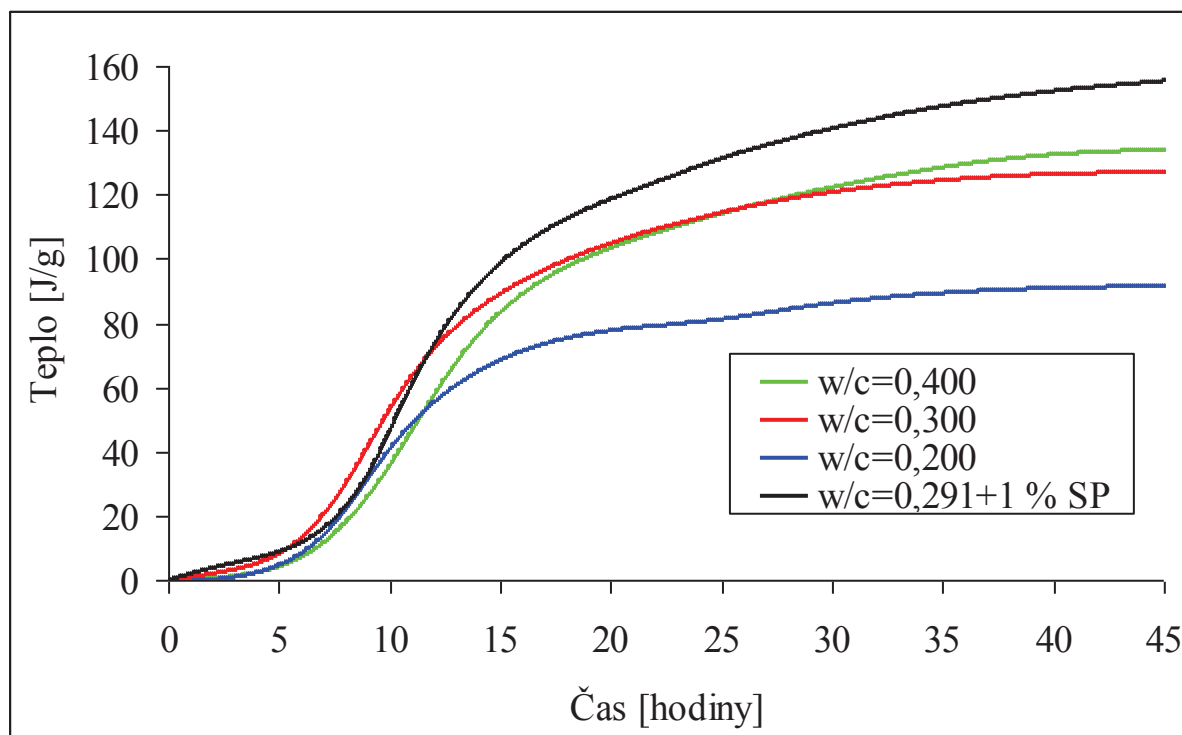
Směs s w/c 0,400 nebyla dostatečně tekutá a to se projevilo jak velice špatnou zpracovatelností, tak zpomalením hydratace a celkově velice nízkou hydratační teplotou. Se zvyšováním w/c roste jak zpracovatelnost směsi, tak i maximální teplota. Je to způsobeno tím, že směs obsahuje dostatek vody, která je potřebná k proběhnutí hydratace. Zde se projevuje vliv velikosti částic soku, které jsou velmi malé, mají velký specifický povrch a proto je potřeba dodat mnohem větší množství vody, aby vznikla směs s přijatelnou zpracovatelností. Přidání 1 % SP umožní snížení w/c, ale zároveň zlepšuje reologické vlastnosti. Směs se dá lépe zpracovat a je dostatečně tekutá pro proběhnutí hydratace, což se projeví dalším vzrůstem maximální teploty.

Nejvíce tepla během hydratační uvolnil vzorek s 1 % SP. U směsi s w/c 0,400 se uvolnilo mnohem méně tepla, což je opět způsobeno nedostatečnou hydratací pasty a proces je mnohem pozvolnější. I zde je patrné, že u směsi s rostoucím w/c a tím pádem i rostoucí tekutostí uvolní nejvíce tepla a dochází k nejrychlejšímu průběhu reakce.

Kalcinovaný bauxit



Graf 21: Hydratační křivka – kalcinovaný bauxit

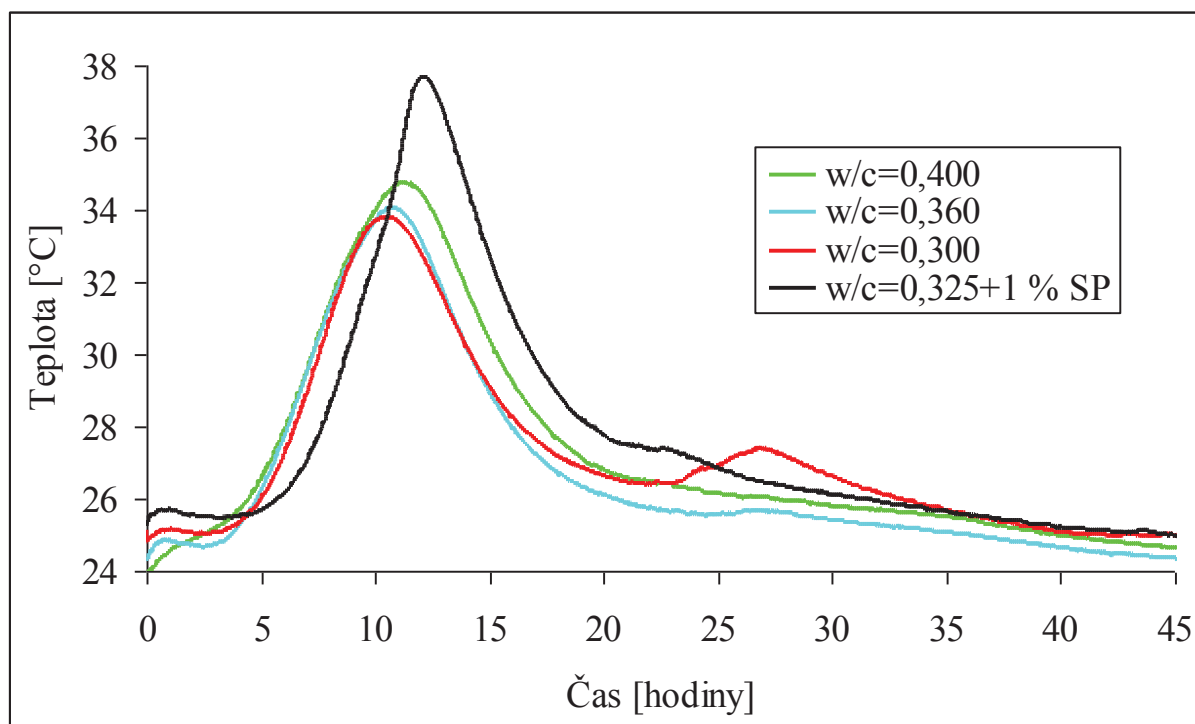


Graf 22: Integrální křivka – kalcinovaný bauxit

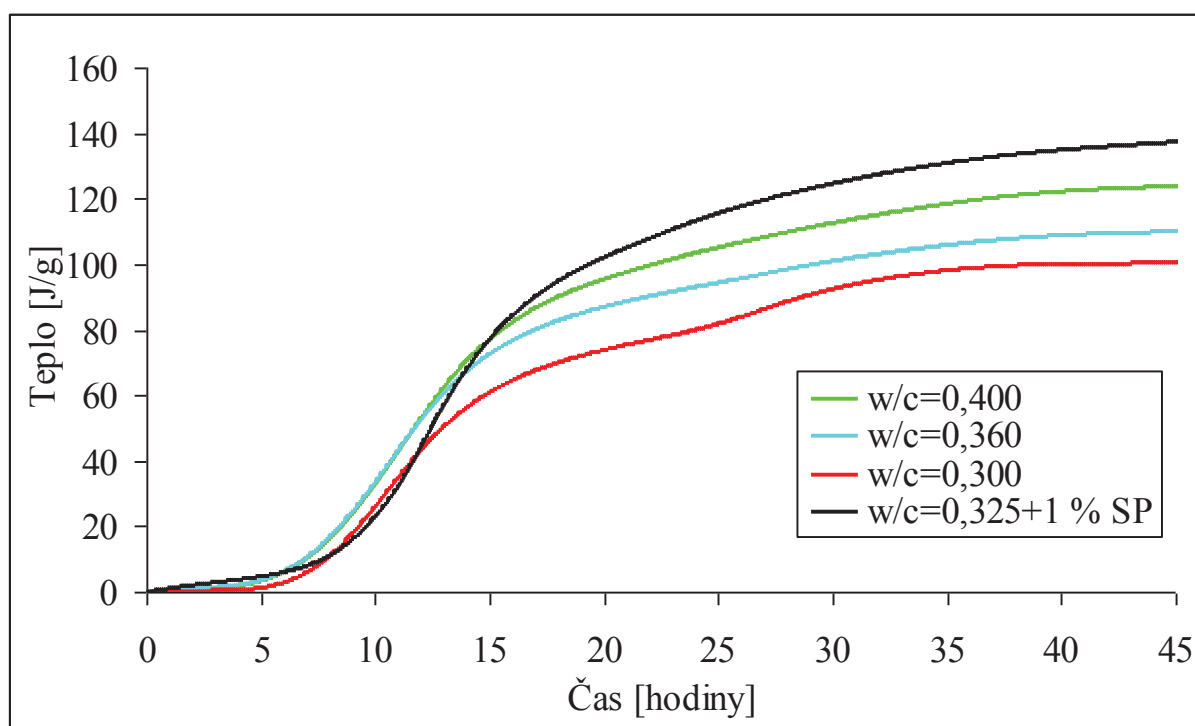
U kalcinovaného bauxitu můžeme pozorovat zrychlení hydratace a postupné snižování maximální teploty se snižujícím se w/c . Při nižším w/c klesá teplota kvůli nedostatku vody a proto nedochází k úplnému zreagování všech částic cementu. Celkově není ale potřeba takové množství vody pro úplné smočení povrchu částic a to se u směsi s w/c 0,400 projevilo zpožděním hydratace. Přidání 1 % SP v tomto případě způsobilo zvýšení maximální hydratační teploty, ale zároveň způsobilo zpomalení hydratace.

Z grafu 19 je patrné, že s rostoucím w/c roste celkové uvolněné teplo. To je způsobeno tím, že dochází k lepší distribuci iontů a to usnadňuje proběhnutí reakce. Ze stejného důvodu se projeví na zvýšení výsledného tepla i přidání superplastifikátoru. U vzorku s w/c 0,400 byla reakce nejvíce zpomalená a proto se dá očekávat ještě nárůst tepla v následujících dnech.

Jemný písek



Graf 23: Hydratační křivka - jemný písek

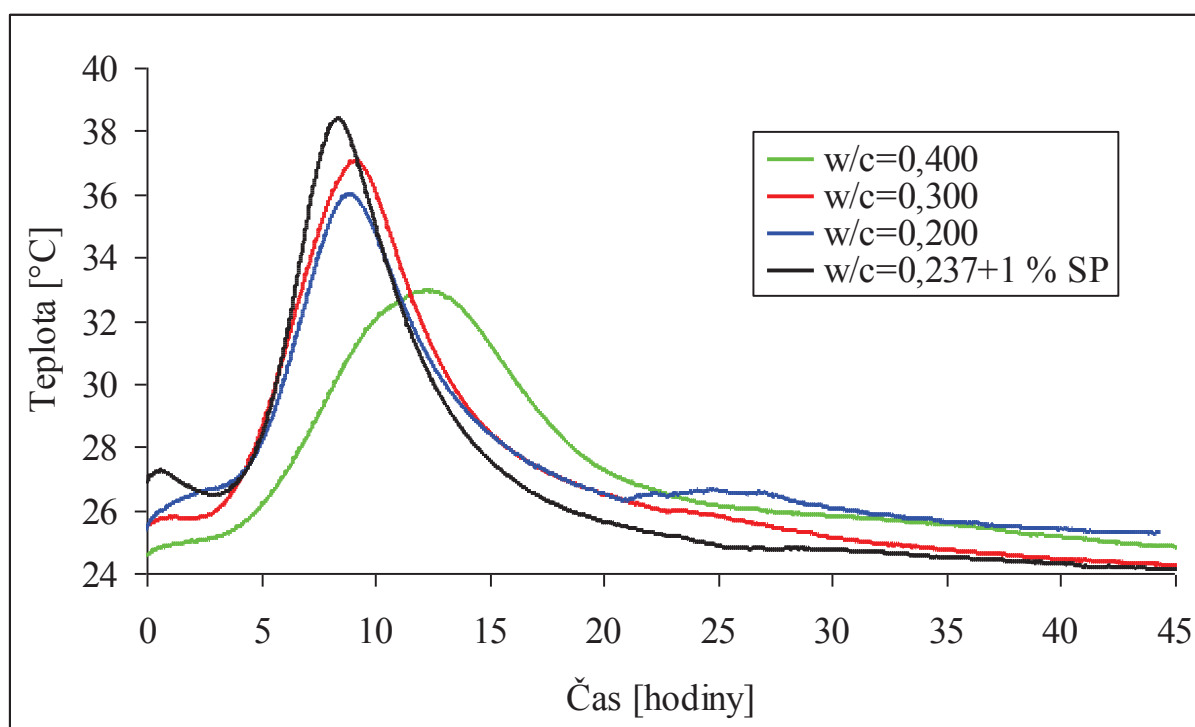


Graf 24: Integrovaná křivka - jemný písek

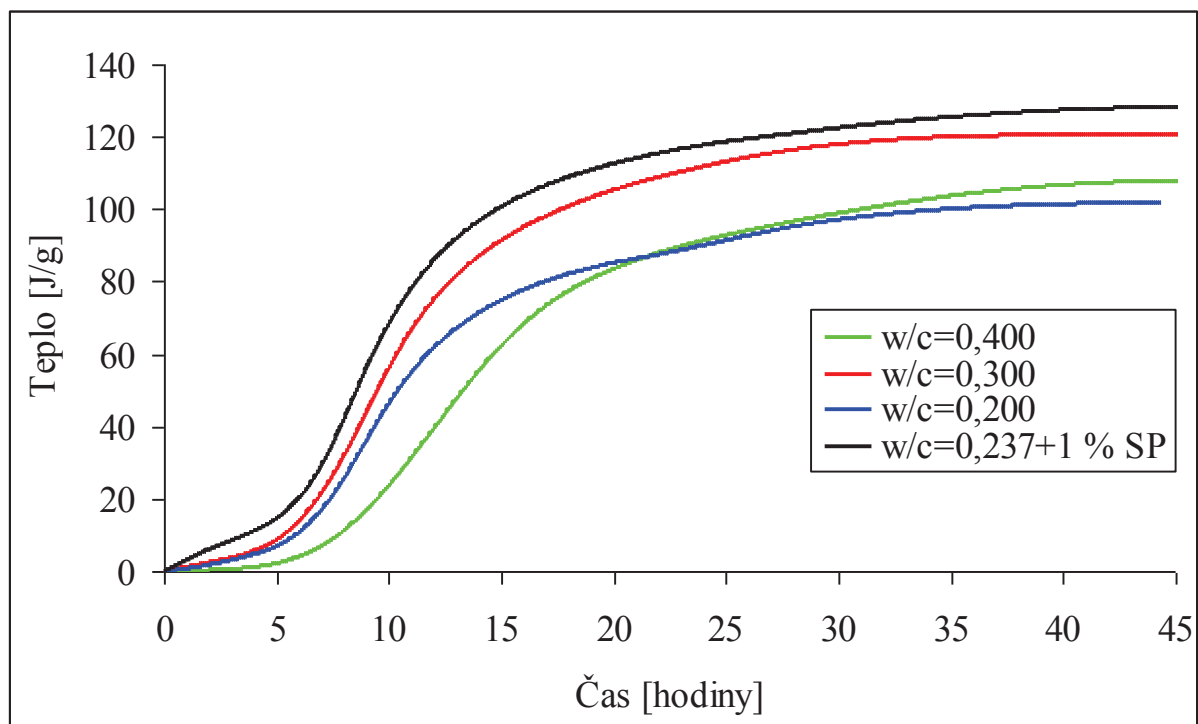
U směsí s jemným pískem lze opět pozorovat rychlejší průběh reakce a snižování maximální teploty s klesajícím w/c. Jemný písek je jemné kamenivo a je potřeba větší množství vody pro proběhnutí reakce. Vliv 1 % SP lze pozorovat na výrazném zvýšení maximální teploty a na zpoždění procesu hydratace.

Je patrné, že s rostoucím w/c roste celkové hydratační teplo. To je způsobeno tím, že se v systému nachází dostatek vody pro proběhnutí hydratační reakce. Adice 1 % SP se projevuje nárůstem tepla, což bylo zapříčiněno zlepšením reologických vlastností a tím pádem usnadněním pohybu iontů ve směsi.

Střední písek



Graf 25: Hydratační křivka - střední písek

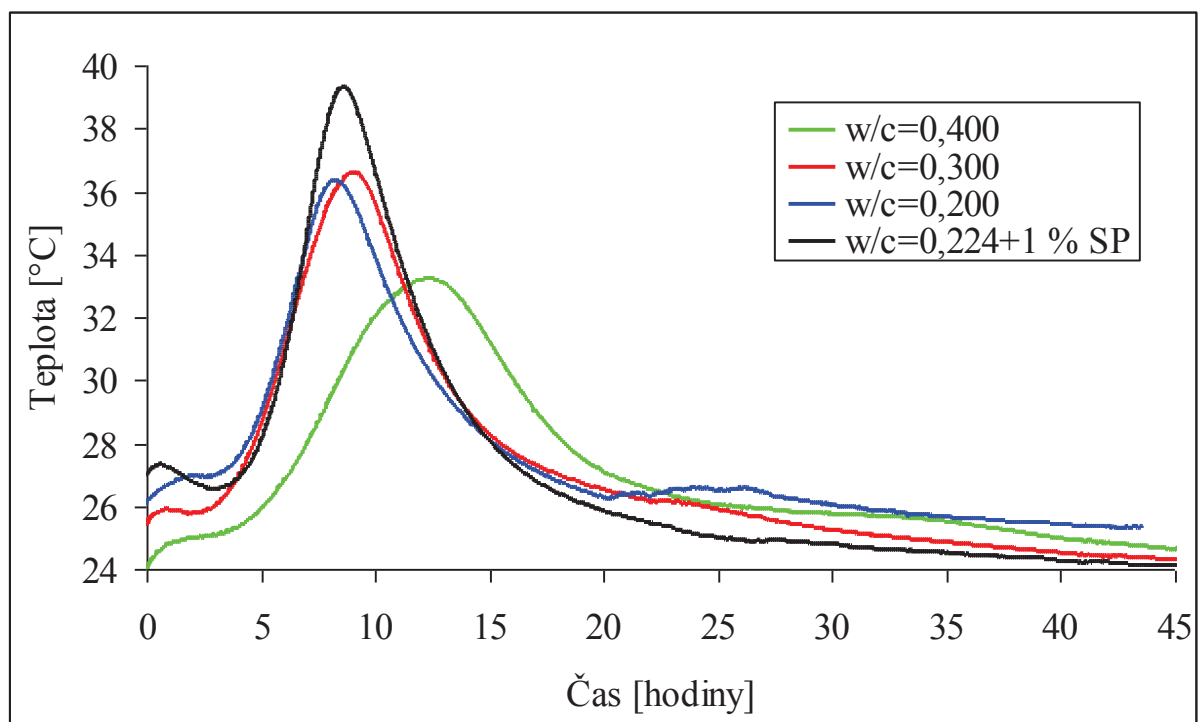


Graf 26: Integrální křivka - střední písek

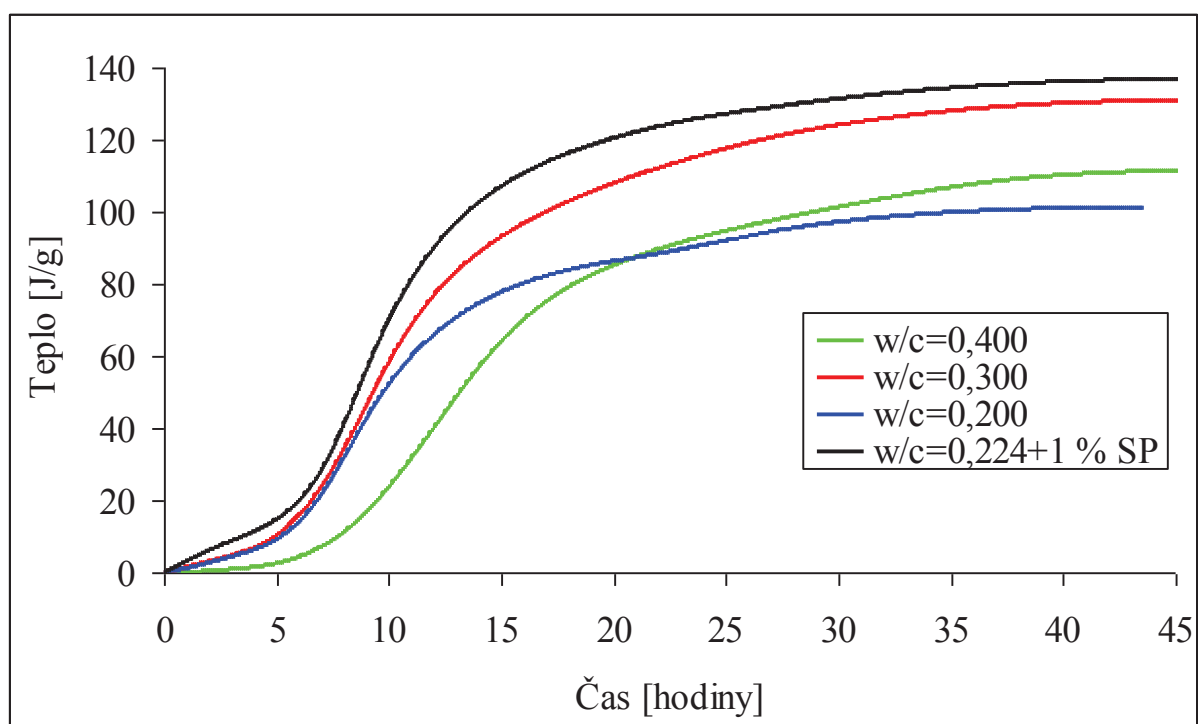
U směsí se středním pískem dochází k nejrychlejšímu průběhu hydratační reakce u směsí nejnižším w/c. S růstem vodního součinitele dochází ke zpomalování hydratace a ke snižování maximální teploty. U vzorku s w/c 0,400 můžeme pozorovat výrazné zpomalení hydratační reakce, tento jev nastal z důvodu velkého množství vody ve směsi. Použití 1 % SP zvyšuje maximální teplotu hydratace, ale nedochází ke zpoždění. Přítomnost SP způsobuje lepší distribuci částic a také zpoždění hydratační reakce, ale díky použití hrubého kameniva lze dosáhnout nízkého w/c, čímž naopak dochází urychlení reakce.

K největšímu uvolnění tepla došlo u vzorku s w/c 0,300, nicméně se dá očekávat, že vlivem zpoždění hydratace u vzorku s w/c 0,400 dojde k uvolnění tepla ještě v následujících dnech. Opět je patrné, že přidání 1 % SP zvyšuje množství uvolněného tepla.

Hrubý písek



Graf 27: Hydratační křivka - hrubý písek



Graf 28: Integrální křivka - hrubý písek

U směsí s hrubým pískem lze opět pozorovat nejrychlejší průběh hydratace u směsí s nejnižšími w/c. S rostoucím w/c rovněž dochází ke snížení maximální teploty hydratace. Použití 1 % SP se projevilo na zvýšení maximální teploty hydratace, ale nedochází k jejímu zpoždění. To je opět způsobeno, stejně jako v případě středního písku, tím, že díky použití hrubého kameniva lze dosáhnout nízkého w/c a tím dojde u urychlení hydratační reakce.

Nejvíce tepla se uvolnilo ze vzorku s w/c 0,300, ale můžeme předpokládat její další růst v následujících dnech. Vliv 1 % SP je opět znatelný a s jeho použitím dochází k největšímu uvolňování tepla.

5 ZÁVĚR

S klesajícím w/c roste pevnost v tlaku i v tahu za ohybu. Toto tvrzení ale platí pouze do určité hodnoty. Snížení w/c pod tuto hodnotu se již neprojeví vzrůstem tlakové a tahové pevnosti, nýbrž jejím snížením, pokud není aplikováno speciálního ošetřování. Je to způsobeno nedostatkem záměsové vody. Tyto směsi jsou také špatně zpracovatelné a směs navíc neobsahuje adekvátní množství vody pro dostatečné proběhnutí hydratace. Tuto hodnotu lze experimentálně stanovit pro každou jednotlivou směs, například kalorimetricky. Dále bylo zjištěno, že s klesající velikostí částic kameniva je potřeba dodat směsi větší množství vody, aby došlo ke vzniku pasty.

Z hlediska pevnosti v tahu za ohybu dochází k výraznému růstu mezi 1. a 7. dnem, dále už lze pozorovat pouze mírný růst a u některých vzorků i pokles pevnosti. Bylo dosaženo výrazně větších pevností v tahu za ohybu při použití jemných kameniv (suk, kalcinovaný bauxit, jemný písek) a to i přes to, že w/c těchto směsí musí být vyšší v porovnání s hrubšími kamenivy. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití kalcinovaného bauxitu, což je způsobeno tím, že bauxit sám o sobě má v porovnání s ostatními kamenivy výrazně vyšší pevnost.

Použití 1 % SP u suku, bauxitu a jemného písku nevede ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu, ale právě naopak k jejímu snížení v porovnání se vzorky, kde nebyl SP použit. Opačná situace nastává ale v případě použití hrubšího kameniva (střední a hrubý písek), kdy se podařilo za použití 1 % SP dosáhnout výrazně vyšší pevnosti v tahu za ohybu. Dá se tedy obecně říci, že čím je kamenivo hrubší, tím je účinek SP na pevnost v tahu za ohybu větší.

U pevností v tlaku byly naměřeny u většiny vzorků největší pevnosti po 7 dnech a následně dochází k jejich mírnému poklesu. Z použitých kameniv bylo opět dosaženo nejlepších výsledků pevnosti v tlaku při použití kalcinovaného bauxitu. Použití suku jako kameniva není vhodné. Kvůli velice malé velikosti částic je potřeba do směsí přidat mnohem větší množství

vody, aby vznikla pasta, v porovnání s ostatními kamenivý, což má za následek výslednou nízkou pevnost v tlaku. Suk se dá spíše využít jako mikroplnivo přidávané v malém množství. Při použití písků bylo zjištěno, že čím menší je velikost částic, tím je větší výsledná pevnost v tlaku.

Použití 1 % SP způsobuje snížení pevnosti v tlaku u směsí s bauxitem a jemným pískem ve srovnání s nesuperplastifikovanými vzorky. U suku lze pozorovat mírné zvýšení pevnosti vlivem snížení w/c. Opět ale dochází k výraznému zvýšení pevnosti v tlaku vlivem 1 % SP u směsí se středním a hrubým pískem, které byly ze všech připravených vzorků nejpevnější a platí, že čím je kamenivo hrubší, tím je účinek SP na pevnost v tlaku větší.

Z důvodu poklesu pevnosti mezi 7 a 28 byla provedena orientační analýza složení vody. Z výsledků analýzy vody bylo zjištěno, že prostředí, ve kterém byly použité vzorky uskladněny, bylo kontaminováno alkalickými látkami z jiných vzorků. Tato problematika by ovšem vyžadovala další zkoumání.

Z výsledků kalorimetrických měření je patrné, že s rostoucím w/c dochází ke zpomalení hydratačního procesu a k růstu maximální hydratační teploty. To je dáno vyšší tekutostí směsi a tím pádem dochází usnadnění distribuce iontů a usnadnění průběhu reakce. Při vysokých hodnotách w/c a použití hrubšího kameniva můžeme pozorovat výrazné zpoždění hydratace a zároveň pokles maximální teploty, celý proces je mnohem pozvolnější z důvodu nadbytku vody ve směsi. Toto zpomalení hydratace se odrazí také na nízkých jednodenních pevnostech. S rostoucím w/c dochází také k většímu uvolnění tepla. S rostoucím uvolněným teplem při hydrataci v rámci jednotlivých kameniv roste výsledná pevnost vzorku.

Přidání 1 % SP se projevuje zvýšením maximální teploty hydratace a zvýšením uvolněného tepla. Přítomnost SP se projevuje zvýšením tekutosti směsi, což má za následek usnadnění proběhnutí reakce. Čím je směs tekutější, tím dochází většinou k dosažení vyšší teploty a uvolnění největšího množství tepla. Superplastifikátor běžně zpomaluje průběh hydratace, ale pokud je vodní součinitel velmi nízký, díky užití hrubšího kameniva, dochází zpětně zase k urychlení reakce.

6 LITERATURA

- [1] Heidelbergcement group. *Průručka technologa – beton – suroviny, výroba, vlastnosti*. 2010.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [3] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. uprav.vyd. Praha: SNTL, 1981, 516 s.
- [4] EBETON. [online]. [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/vyroba-cementu>
- [5] ŠILER, Pavel. *Studium vlivu přísad a příměsí na vlastnosti vysokohodnotných betonů*. Brno, 2010. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [6] COLLEPARDI, Mario. *The new concrete*. S.l.: Grafiche Tintoretto, 2006, vii, 421 s. ISBN 88-901-4694-X.
- [7] TEGEL, Michal. *Slévarenské formovací směsi s cementovými pojivy*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2001, 26 s. ISBN 80-214-2040-5.
- [8] COLLEPARDI, M. *Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. Cement and Concrete Composites*. 1998, roč. 20, 2-3, s. 103-112. ISSN 09589465. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00071-7.
- [9] ŠRŮMA, Vlastimil. Výškové budovy a vysokohodnotný beton. In: *Časopis stavebnictví* [online]. 2009 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/vyskove-budovy-a-vysokohodnotny-beton_N2358
- [10] ŠKVÁRA, František. *Technologie anorganických pojiv II: užití maltovin. Koroze cementu*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1995, 184 s. ISBN 80-708-0225-1.
- [11] BRANDŠTETR J., J. LUKÁŠ, J. KRÁTKÝ, Z. HANÁKOVÁ. Mikrokamenivo jako složka betonů vysokých užitných vlastností. *Silika* 13, 2003, č. 1-2, s. 40-45.
- [12] LUKÁŠ, J., J. BRANDŠTETR, J. MELCHER, J. KRÁTKÝ, M. KARMAZÍNOVÁ, T. VYMAZAL a V. BÍLEK. Složení a vlastnosti některých typů vysokohodnotných a samozhutňujících betonů. *Beton*. 2003, č. 6, s. 10-16.
- [13] JEDLA, Pavel. *Přísady a příměsi pro výrobu vysokohodnotných betonů*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [14] BAYER, Petr. *Vliv popílku na vlastnosti cementových malt*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Šiler, Ph.D.
- [15] ŠILER, Pavel, Josef KRÁTKÝ, Iva KOLÁŘOVÁ, Jaromír HAVLICA a Jiří BRANDŠTETR. Calorimetric determination of the effect of additives on cement

hydration process. *Chemical Papers*. roč. 67, č. 2, s. 213-220. ISSN 0366-6352. DOI: 10.2478/s11696-012-0256-x.

[16] ŠILER, Pavel, Josef KRÁTKÝ, N. BELIE, Jaromír HAVLICA a Jiří BRANDŠTETR. Isothermal and solution calorimetry to assess the effect of superplasticizers and mineral admixtures on cement hydration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. roč. 107, č. 1, s. 313-320. ISSN 1388-6150. DOI: 10.1007/s10973-011-1479-8.

[17] BRANDŠTETR, Jiří, J. POLCER, J. KRÁTKÝ, R. HOLEŠÍNSKÝ a J. HAVLICA. Possibilities of the use of isoperibolic calorimetry for assessing the hydration behavior of cementitious systems. *Cement and Concrete Research*. roč. 31, č. 6, s. 941-947. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00495-1

[18] Centrum materiálového výzkumu. *Centrum materiálového výzkumu: Laboratoř anorganických pojiv* [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/>

[19] SYVITSKI, James P. M. *Principles, methods and application of particle size analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-052-1044-615.

[20] PABST, W. a E. GREGOROVÁ. *Charakterizace částic a částicových soustav*. Praha: VŠCHT, 2007.

[21] FOJTÍK, Tomáš. Současný stav problematiky alkalicko-křemičité reakce v betonu a metody její detekce. *Brno: VUT Brno*, 2004.

[22] BREITENBÜCHER, Rolf. Alkalicko-křemičité reakce – důsledky pro cementobetonové kryty. *Strasse + Autobahn*. 2006, č. 4. Dostupné z: www.silmos.cz/file.php?id=628

[23] KOPLÍK, Jan. Rentgenová fluorescenční spektrometrie. In: *Chempoint* [online]. 2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-fluorescencni-spektrometrie>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SP	superplastifikátor
w/c	vodní součinitel
kalc.	kalcinovaný
A	Al_2O_3
H	H_2O
C	CaO
S	SiO_2
$\text{S}\square$	SO_3
F	Fe_2O_3
CH	portlandit
CA	monokalciumaluminát
C_3S	trikalciumsilikát, alit
C_2S	dikalciumsilikát, belit
C_3A	trikalciumaluminát, celit
C_4AF	brownmillerit
CSH gel	kalciumhydrosilikátový gel
$\text{C}_6\text{AS}\square_3\text{H}_{32}$	ettringit
SCC	Self-Compacting Concrete (samozhutnitelný beton)
HDC	High-Durability Concrete (vysokotrvanlivý beton)