

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

LUKÁŠ BEJČEK

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra betonových a zděných konstrukcí

VLIV DÁVKOVÁNÍ PLASTIFIKAČNÍCH PŘÍRAD NA
VLASTNOSTI BETONU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Lukáš Bejček

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Praha 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s využitím poskytnutých odborných zdrojů a konzultací. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Jsem si vědom toho, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb. (autorský zákon).

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Ústřední knihovně Fakulty stavební a Fakulty architektury ČVUT.

V Praze dne 5. ledna 2020

.....

Lukáš Bejček

Poděkování

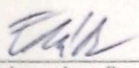
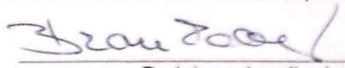
V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Josefu Fládřovi, Ph.D. za věcné a cenné připomínky při konzultacích, zdroje a odborné vedení, které vedlo k úspěšnému dokončení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti TBG METROSTAV s.r.o., konkrétně panu Ing. Jakubovi Hobzovi, za výpomoc s prováděným měřením a umožnění experimentální části bakalářské práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat firmám STACHEMA CZ s.r.o. a SQZ, S.R.O., v jejichž laboratořích byla provedena část měření.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

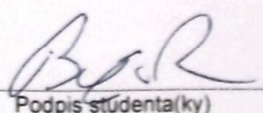
I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Bejček</u>	Jméno: <u>Lukáš</u>	Osobní číslo: <u>438046</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Vliv dávkování plastifikačních přísad na vlastnosti betonu</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Influence of plasticizer dosing on concrete properties</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši k tématu vlivu plastifikátoru na průběh hydratace se zaměřením na následující body: - Popište základní typy plastifikátorů a superplastifikátorů se zaměřením na polykarboxylátové plastifikátory. - Popište průběh hydratace cementu. - Uveďte jak jednotlivé plastifikátory ovlivňují zpacovatelnost čerstvého betonu.	
Realizujte experimentální program v následujících bodech: - Ověřte účinnost dvou druhů plastifikátorů na konzistenci čerstvého betonu stejného složení. - Ověřte vliv dvou druhů plastifikátorů na tlakovou pevnost betonu. - Otestujte vliv dodatečného dávkování plastifikátoru do čerstvého betonu. - Získané výsledky porovnejte mezi sebou a s technickými listy výrobců plastifikátorů.	
Seznam doporučené literatury: Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000 Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005 Collepardi, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006 Šauman, Z.: Maltoviny I, VUT v Brně, 1993	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Josef Fládr, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>26.9.2019</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>6.1.2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá především plastifikačními přísadami používaných při výrobě betonu. Konkrétně superplastifikátory na bázi polykarboxylátu a jejich vlivu na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Mimo typů plastifikačních přísad bude popsán také průběh hydratace cementu a jednotlivé zkoušky prováděné během experimentu, který je hlavní částí práce. V experimentální části bude provedeno měření, které bude spočívat v porovnávání dvou druhů superplastifikátorů na bázi polykarboxylátu a jejich vlivu na vlastnosti betonu.

Klíčová slova

Plastifikátor, superplastifikátor, pevnost v tlaku, konzistence čerstvého betonu, hydratace cementu

Abstract

This bachelor thesis is mainly about plasticizing ingredient and their use during concrete production. Specifically, polycarboxylate based superplasticizer and their influence on fresh and hardened concrete properties. Aside from plasticizing ingredient we will describe process of cement hydration and specific examinations used during our experiment, which is the main part of this thesis. In the practical part we will do an experiment which focus on determining differences between two types of polycarboxylate based superplasticizers and their effect on concrete properties.

Key words

Plasticizer, superplasticizer, compressive strength, consistency of fresh concrete, cement hydration

Obsah

1. Úvod	8
2. Teoretická část	10
2.1. Složení betonových směsí	10
2.2. Přísady	11
2.2.1. Přísady snižující spotřebu vody	11
2.3. Plastifikátory	12
2.3.1. Melaminové plastifikátory	13
2.3.2. Naftalenové plastifikátory	14
2.3.3. Lignosulfonátové plastifikátory	14
2.4. Superplastifikátory	15
2.4.1. Historie superplastifikátorů	16
2.4.2. Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů	17
2.4.3. Vliv superplastifikátorů na vlastnosti čerstvého betonu	18
2.5. Vodní součinitel	21
2.6. Hydratace cementu	22
2.6.1. Stádia hydratace cementu	22
2.6.2. Smíchání s vodou	23
2.6.3. Indukční perioda	23
2.6.4. Počátek tuhnutí	25
2.6.5. Tvrdnutí	26
2.6.6. Zpomalení hydratace	26
2.7. Popis prováděných zkoušek	27
2.7.1. Měření konzistence	27
2.7.2. Měření obsahu vzduchu	28
2.7.3. Stanovení objemové hmotnosti	29
2.7.4. Pevnost v tlaku	30
3. Experimentální část	31
3.1. Porovnávání superplastifikační přísady	32
3.2. Přehled receptur	33

3.3. Křivka zrnitosti	35
3.4. Postup měření	36
3.5. Harmonogram měření	40
3.6. Výsledky měření	40
3.6.1. Zpracovatelnost	40
3.6.2. Pevnost	43
3.6.3. Obsah vzduchu	46
3.6.4. Objemová hmotnost	47
3.6.5. Teplota prostředí a čerstvého betonu	48
3.6.6. Odpor konzistoměru	50
3.6.7. Vodní součinitel	51
4. Závěr	52
4.1. Účinnost plastifikátorů na konzistenci čerstvého betonu	52
4.2. Vliv plastifikátoru na tlakovou pevnost betonu	53
4.3. Vliv dávkování plastifikátoru do čerstvého betonu	53
4.4. Porovnání výsledků s technickými listy výrobců	54
5. Seznam zdrojů	55
6. Seznam tabulek	57
7. Seznam obrázků	58
8. Seznam vzorců.....	60
9. Seznam grafů	61

1. Úvod

Nároky na vlastnosti betonu se za posledních 50 let výrazně zvýšily. Beton se díky svým možnostem využití stal jedním z nejpoužívanějších stavebních materiálů vůbec, a to nejen v Evropě. Dochází k jeho neustálému vývoji, a proto je potřeba přizpůsobovat se novým technologickým postupům, které se postupně aplikují i v praxi. Beton se už dávno neskládá pouze z cementu, vody a kameniva a důležitost dalších přimíchávaných látek ve formě přísad a příměsí stále roste. Plastifikační přísady jsou jednou z nejčastěji užívaných přísad při výrobě betonu a důvodů je hned několik. Mají výrazný vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu, ale zlepšují také jeho mechanické vlastnosti jako je pevnost a trvanlivost. Jsou nepostradatelnou složkou při výrobě moderních betonů jako je UHPC (beton dosahující pevností v tlaku vyšších jak 80 MPa) nebo SSC (samozhutnitelný).

Počátky plastifikačních přísad se datují do 30. let 20. století, přesto se v praxi začaly využívat mnohem později. V počátku se jednalo hlavně o plastifikátory na bázi lignosulfonátů, které v té době byly vyhovující, protože betonové směsi obecně dosahovaly pevnosti mezi 15 až 25 MPa a také byly cenově dostupné, proto nebyla třeba používání plastifikátorů s vyšší účinností. Už v té době byly plastifikátory primárně používány na zlepšení zpracovatelnosti betonových směsí přidáním přímo na stavbě, ale většina stavařů byla vůči jejich používání spíše skeptická. Nejběžnějším způsobem, jak zlepšit zpracovatelnost, bylo používání vody, a na to byla široká obec již zvyklá. Problém byl také v intervalu, po který byly plastifikátory schopny zajistit zpracovatelnost, která byla poměrně omezená.

V dnešní době máme superplastifikátory na bázi polykarboxylátů, které jsou součástí většiny používaných betonových směsí. Mimo to, že jsou jednou ze složek většiny receptur na výrobu betonu, jsou také používány na stavbách jako alternativa na zlepšení zpracovatelnost čerstvého betonu. Zpracovatelnost betonu je významná při přepravě, čerpání a ukládání betonu a má vliv i na obalení ocelové výztuže. Zároveň je jednou z prvních vlastností, kterou můžeme na čerstvém betonu pozorovat, proto často dochází k jejímu nepatřičnému upravování. Je-li čerství beton tekutější, je také daleko snadnější ho ukládat, není třeba ho tolik vibrovat a zhutňovat. Dříve se na zlepšení zpracovatelnosti používala zmíněná voda, té je ale potřeba přidat daleko vyšší množství a může mít negativní vliv na mechanické vlastnosti betonu. Přesto, že je přidávání vody do čerstvého betonu výrobcí zakázáno, je běžnou praxí, že prováděcí firmy přebírají zodpovědnost na sebe a vodu do betonu stále přidávají. Pravděpodobně dávají přednost použití vody před plastifikátory, protože se obávají, že zlepšení zpracovatelnosti bude mít pouze

krátkodobý účinek, anebo se chtějí vyvarovat přidávání chemické látky, s jejíž vlastnostmi a účinky nemusejí být plně obeznámeni.

To je jedním z hlavních důvodů, proč jsem se rozhodl v praktické části ověřit vliv superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů na vlastnosti betonu. Budeme mezi sebou porovnávat dva druhy superplastifikačních přísad na bázi polykarboxylátů, které budou do betonu přimíchávány ve třech různých variantách. Cílem experimentu bude porovnat vliv způsobu přidávání superplastifikačních přísad na vlastnosti betonu a zároveň účinnost jednotlivých přísad mezi sebou.

2. Teoretická část

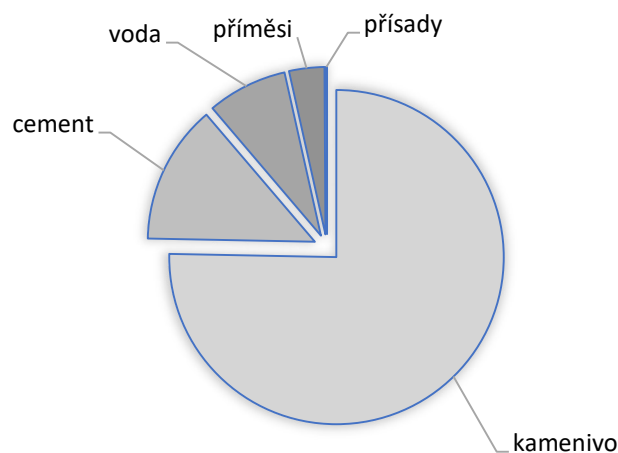
V této části budou popsány jednotlivé typy plastifikačních přísad a jejich vliv na vlastnosti betonu. Stručně se seznámíme s procesem hydratace cementu, který je nejdůležitějším procesem při výrobě betonu. V poslední řadě budou popsány zkoušky, které budou provedeny v experimentální části.

2.1 Složení betonových směsí

Hlavními složkami, z kterých vyrábíme běžný beton je plnivo ve formě kameniva a pojivo, tzv. cementová matrice skládající se z vody a cementu. Mimo těchto složek najdeme v moderních betonech ještě přísady a příměsi, které jsou zastoupeny v nejmenším množství, jsou však nepostradatelnou součástí většiny betonových směsí.

Přibližné zastoupení jednotlivých složek betonu:

- Kamenivo 75 %
- Cement 13,4 %
- Voda 7,7 %
- Příměsi 3,4 %
- Přísady 0,1 %



Graf 1 - Složení betonu, zdroj: [4]

V této práci se budeme zaměřovat hlavně na přísady, konkrétně superplastifikátory.

2.2 Přísady

Přísady můžeme definovat jako chemické látky, které upravují některou z vlastností betonu, a to jak čerstvého, tak ztvrdlého. V betonu jsou zastoupeny v nejnižším množství, ale přesto mají na vlastnosti velký vliv. Jejich množství se udává v % hmotnosti cementu, které obvykle nepřesahuje 5 %.

Přísady dělíme hlavně podle toho, které vlastnosti ovlivňují, např.:

- Urychlovače
- Zpomalovače
- Provdzušňovače
- Stabilizátory
- Aktivátory
- Plastifikátory
- Superplastifikátory

2.2.1 Přísady snižující spotřebu vody

Jak už název napovídá, hlavní funkcí těchto přísad je snížení záměsové vody a současně zachovat zpracovatelnost betonu. Podle evropské normy EN 934-2 jsou přísady snižující spotřebu vody definovány následovně: musí snížit potřebu záměsové vody minimálně o 5 % a zároveň pevnosti betonu po 7 a 28 dnech musí být alespoň o 10 % vyšší než bez u stejné směsi bez přísady snižující spotřebu vody. Obě tyto kritéria produkty dostupné na trhu s přehledem splňují. [17]

Přísady snižující spotřebu vody lze v průběhu výroby použít různými způsoby s odlišnými výsledky. Jejich vliv na vlastnosti a výrobu betonu můžeme rozdělit do 3 různých kategorií podle toho, kterou vlastnost či proces ovlivňují. První z nich může být snížení spotřeby záměsové vody, čímž dojde ke zlepšení pevnosti a trvanlivosti ztvrdlého betonu, další možnou aplikací je současně s obsahem vody snížit obsah cementu se zachováním stejného vodního součinitele, třetím způsobem využitý, který může být užitečný zejména u masivních betonových konstrukcí je snížení hydratačního tepla.

Z pohledu chemického složení mají přísady snižující spotřebu vody mnoho společného s přísadami zpomalujícími tuhnutí (např. lignosulfonáty, glukonát, či glukóza), což je u těchto přísad nežádoucí, protože tím dochází ke snížení počátečních pevností, proto se do nich dodatečně přimíchávají další sloučeniny

tzv. urychlovače, které zpomalující efekt potlačují (např. dusitan vápenatý, thiokyanát, formát).

Podle obsahu urychlovací složky jsou přísady na snížení obsahu vody rozděleny do tří kategorií:

- Typ R – zpomalující přísada snižující obsah vody
- Typ N – přísada bez vlivu na průběh tuhnutí
- Typ A – urychlující přísada snižující obsah vody

Jako příklad rozdílné efektivity těchto tří druhů přísad snižující spotřebu vody se můžeme podívat na měření, které v roce 1984 provedl Mario Collepardi. Jedná se o klasický beton při teplotě 20 °C z portlandského cementu CEM I, obsah 300 kg/m³, mimo těchto hodnot všechny varianty vykazovali vyšší pevnost než referenční receptura. [1]

Tabulka 1: Vliv přísad snižující spotřebu vody na vlastnosti betonu., zdroj: [1]

směs	referenční	N	A	R	N'	A'	R'
w/c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,49	0,51	0,49
sednutí kužele (mm)	70	155	140	150	75	65	70
poměr voda / přísada (%)*	-	0,2	0,8	0,3	0,2	0,8	0,3
doba tuhnutí (min)	215	275	195	225	245	185	220

* procento z hmotnosti cementu

X – stejný vodní součinitel jako referenční receptura

X' – stejná zpracovatelnost jako referenční receptura

Z výsledků je patrný výrazný vliv na zpracovatelnost betonu, pokud přísady snižující obsah vody použijeme bez změny ostatních složek receptu, hovoříme o nich jako o plastifikátorech.

2.3 Plastifikátory

Jsou nejpoužívanější přísadou při výrobě betonu. Přispívají ke snížení a neutralizaci povrchového napětí, čímž mění náboje pevných částic v betonové směsi. Působení plastifikátoru způsobuje elektrostatické odpuzování cementových zrn, čímž přispívají k zachování jejich disperze. Pokud betonová směs obsahuje dispergovaná zrna cementu, snižuje se tím potřebné množství záměsové vody a současně dojde ke zlepšení zpracovatelnosti betonu. Takto

vyrobený beton vykazuje větší hutnost, která přispívá k dosažení vyšších pevností zatvrdlého betonu.

Každý druh plastifikátoru se liší v účinnosti a vlivu na tyto jednotlivé vlastnosti. Plastifikátory můžeme rozdělit do čtyř základních skupin na základě jejich chemického složení.

- Sulfáty melaminů (polykondenzáty sulfonovaných formaldehydů a melaminů)
- Sulfáty naftalenů (polykondenzáty sulfonovaných formaldehydů a melaminů naftalenů)
- Lignosulfonáty
- Polykarboxyláty (superplastifikátory)

2.3.1 Melaminové plastifikátory

Nejčastěji se jedná o sodné soli sulfonovaných melaminů. Obvykle jsou vyráběny ve formě čiré až žlutavé kapaliny, vyskytují se však i ve formě bílého prášku.



Obrázek 1: Melaminové plastifikátory, zdroj: [2]

Standardně obsahují přibližně 22–40 % sušiny, s jejich využíváním se můžeme setkat v Evropě i Severní Americe.

Hlavních předností melaminových plastifikátorů je hned několik, ovšem v některých případech se může jednat také o nevýhodu, to záleží především na konkrétních potřebách. Oproti naftalenovým nezpožďují tuhnutí, jejich nižší obsah sušiny snižuje nebezpečí předávkování plastifikátorem, zachycují méně

vzduchu a snadněji zachovávají stabilní provzdušnění, nezbarvují betonovou směs, které může mít architektonický význam u pohledových betonů, betonů s obarvující přísadou, či betonu z bílého cementu. Jsou jedny z prvních používaných plastifikačních přísad a jejich spolehlivost je na vysoké úrovni.

2.3.2 Naftalenové plastifikátory

Přesto, že se jedná o jedny z prvních patentovaných plastifikátorů (Tucker, 1938), k jejich používání při výrobě betonu došlo až v 60. letech 20. století. Nejběžnějším typem, ve kterém se vyskytují je buď prášek nebo kapalina hnědé barvy. V obou případech se jedná o sodné soli, případně také soli vápenaté, které jsou vhodné, pokud konstrukce vyžaduje nízký obsah chloridů, např. železobeton, předpjatý beton, nebo beton v jaderném průmyslu. Často se také dává přednost vápenatým solím kvůli nižšímu vlivu potenciálního nebezpečí alkalicko-křemičité reakce.



Obrázek 2: Naftalenové plastifikátory, zdroj: [2]

Standardně obsahují 40-42 % sušiny, což z nich dělá cenově zajímavý druh plastifikátoru. Užitečnou vlastností naftalenových plastifikátorů je zpoždění tuhnutí. Další výhodou je, že při jejich použití obvykle nedochází k napětí betonové směsi a je možné je dávkovat v různých krocích výroby.

2.3.3 Lignosulfonátové plastifikátory

Plastifikátory na bázi lignosulfonanu jsou historicky jedny z nejčastěji používaných přísad do betonu. Hlavním důvodem jejich častého užívání je dostupnost surovin k jejich výrobě, konkrétně se jedná o odpad při výrobě papíru a jsou tedy v tomto ohledu velmi ekologické a zároveň cenově dostupné.

Stejně jako je tomu u naftalenových plastifikátorů jedná se převážně o hnědý roztok či prášek, rozeznat je od sebe můžeme například pomocí infračervené spektroskopie.



Obrázek 3: Lignosulfonátové plastifikátory, zdroj [2]

Lignosulfonátové plastifikátory mají poněkud složitější dávkování kvůli svým vedlejším efektům, musí se hlídat, aby dávka nepřekročila určitou mez. To je způsobeno příměsí průmyslových odpadů, který se používá při jejich výrobě. Lignosulfonátové plastifikátory se ale dají dále rafinovat a vyšlechtit z nich superplastifikátor, nebo se často smíchávají s již zmíněnými naftalenovými či melaminovými plastifikátory, poté už jsou svým složením daleko vhodnější na použití například k výrobě UHPC.

2.4 Superplastifikátory

Superplastifikátory známé také pod názvem high-range water reducers, v překladu jako přísady silně snižující spotřebu vody jsou nejpodstatnějším typem chemických přísad vůbec.

Podle evropské normy EN 934-2 je lze definovat jako přísady, které z betonu dělají lépe zpracovatelný se sednutím min. 120 mm, oproti referenčnímu (sednutí 30 mm) ihned po namíchání a zároveň obsah vzduchu v betonu nesmí být o více jak 2 % vyšší než bez přidání přísady. Dále musí snížit obsah záměsové vody minimálně o 10 % se zachováním stejné zpracovatelnosti a současně vykazovat vyšší pevnost po 2 dnech o 40 % a o 15 % po 28 dnech oproti referenční receptuře. Stejně jako u klasických plastifikátorů je tento požadavek u superplastifikátorů na trhu s přehledem splněn.

2.4.1 Historie superplastifikátorů

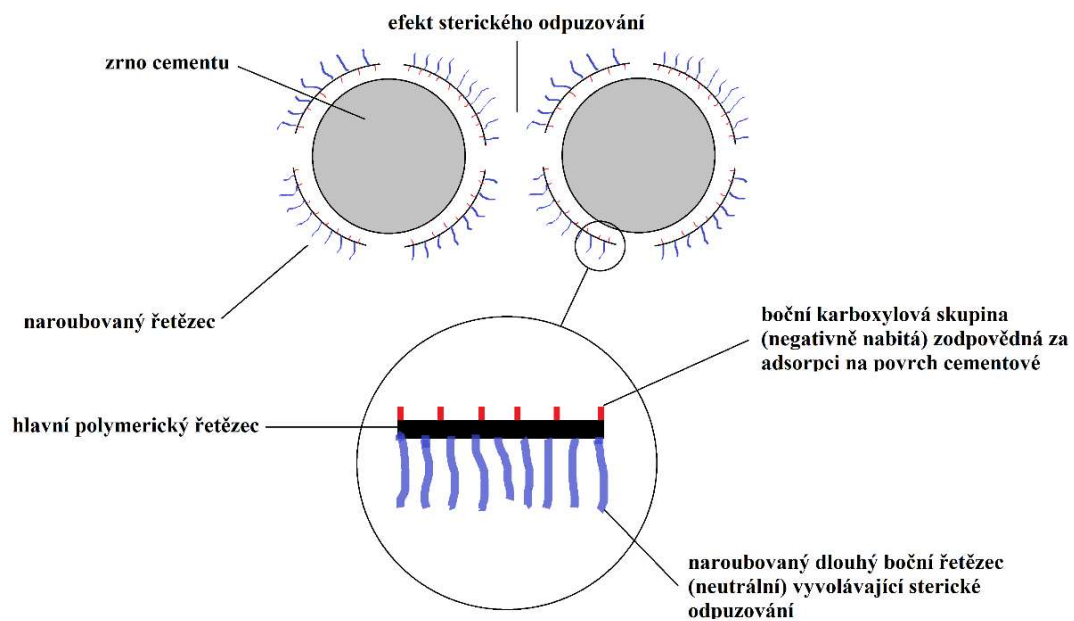
V počátcích se nejčastěji používaly superplastifikátory, kde hlavní složkou byly syntetické polymery, které byly rozpustné ve vodě, konkrétně sulfonovaný melaminformaldehyd kondenzát, modifikované lignosulfáty bez cukrů nebo sulfonovaný naftalenformaldehyd kondenzát. V současnosti jsou nejpoužívanější superplastifikátory na bázi polymerů polykarboxylátů, k jejich vývoji došlo hlavně díky snaze o zachování zpracovatelnosti čerstvých betonových směsí a pokusu o efektivnější snížení vodního součinitele. Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů jsou výrazně účinnější při snižování vodního součinitele a zároveň jsou schopné zachovat svou zpracovatelnost.

2.4.2 Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů

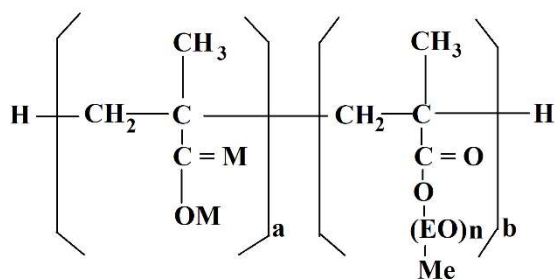
Jsou to nejefektivnější superplastifikátory, výhodou je delší zachování stejné zpracovatelnosti po dobu 45-90 minut od namíchání směsi. Jejich užitím můžeme dosáhnout snížení vodního součinitele na cca 0,25. Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů se často používají při výrobě UHPC a SCC. Obecně superplastifikátory zvyšují tekutost betonových směsí tím, že dispergují větší aglomeráty obsažené v cementové pastě na jednotlivá zrna cementu, čímž zvyšují tekutost cementové pasty a následně dojde ke zvýšení tekutosti celé betonové směsi.

U superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů je disperzní mechanismus založen na principu sférického odpuzování, které způsobují dlouhé boční řetězce s neutrálním nábojem. Negativně nabitě aniontové skupiny (COO^-) způsobují adsorpci polymeru na povrchu cementových částic. Na molekulách polymeru jsou naroubované řetězce spojené na povrchu cementových částic, které od sebe odtlačují částice a následně zabraňují spojení do velkých nepravidelných aglomerátů.

Efekt sférického odpuzování je hlavním rozdílem superplastifikátorů oproti klasickým plastifikátorům, kde působí pouze elektrostatické odpuzování.



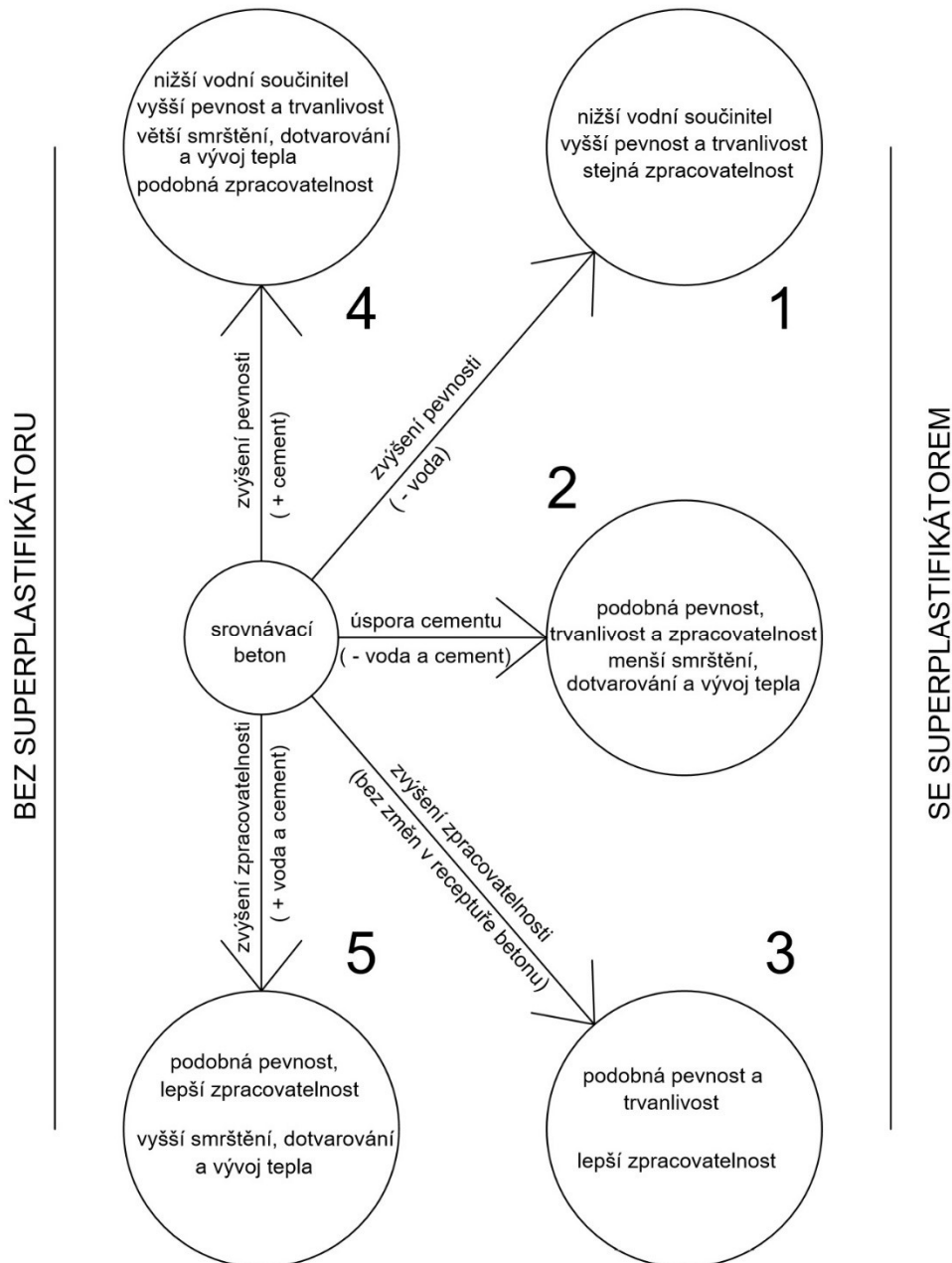
Obrázek 4: Princip působení plastifikátoru na bázi polykarboxylátu., zdroj: [1]



Obrázek 5: Chemická struktura polykarboxylátů, zdroj: [1]

2.4.3 Vliv superplastifikátorů na vlastnosti čerstvého betonu

Různě vlivy superplastifikátorů na vlastnosti a způsob výroby betonu je patrný z diagramu na obrázku č. 6, chovají se podobně jako ostatní přísady snižující obsah vody, ale s větší efektivitou.



Obrázek 6: Diagram vlivu plastifikátoru na vlastnosti betonu., zdroj: [1]

- Přidáním superplastifikátoru a současným ubráním vody dochází ke zvýšení pevnosti a trvanlivosti a zároveň ke snížení vodního součinitele, zpracovatelnost zůstává zhruba stejná.

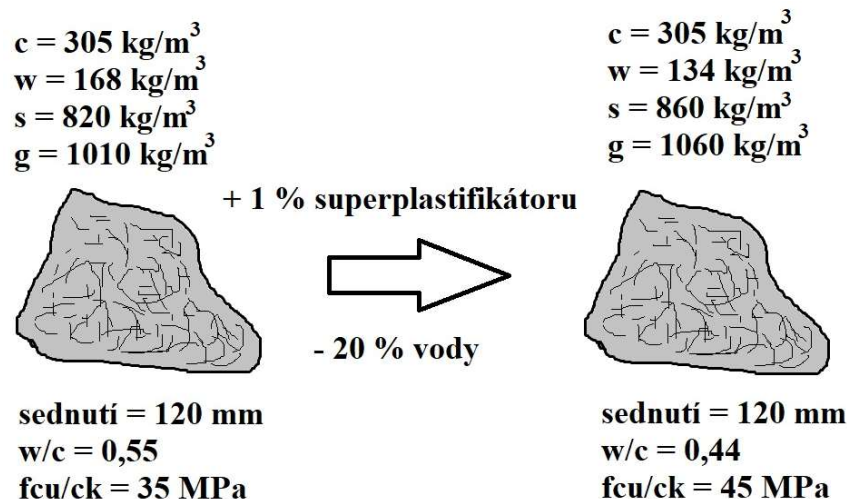
- b. Přidáním superplastifikátoru a současným ubráním vody i cementu dostaneme podobnou pevnost, trvanlivost i zpracovatelnost a zároveň snížíme vliv smrštění, dotvarování a vývoj tepla.
- c. Pokud přidáme superplastifikátor a zachováme recepturu beze změny, dostaneme beton s podobnými vlastnostmi a lepší zpracovatelností.

V dalších případech bez přidání superplastifikátoru sice můžeme také zlepšit zpracovatelnost nebo pevnost, ale zároveň dochází ke zvýšení smrštění, dotvarování a vývoji hydratačního tepla, které patří mezi nežádoucí vlastnosti, které se naopak v praxi snažíme eliminovat.

- d. Přidáním cementu snížíme vodní součinitel a dosáhneme vyšších pevností a trvanlivosti při podobné zpracovatelnosti, ale současně i zvýšíme dotvarování, smrštění a hydratační teplo.
- e. Přidáním vody i cementu sice zachováme vodní součinitel a dosáhneme lepší pevnosti a zpracovatelnosti, ovšem stále je zde problém se zvýšením vlivu dotvarování, smrštění a vyšším vývojem hydratačního tepla.

a. Zvýšení pevnosti

Při použití superplastifikátoru na zvýšení pevnosti hraje významnou roli již zmíněný vodní součinitel. Pokud chceme zvýšit pevnost a trvanlivost a současně zachovat zpracovatelnost čerstvého betonu je potřeba snížit vodní součinitel.



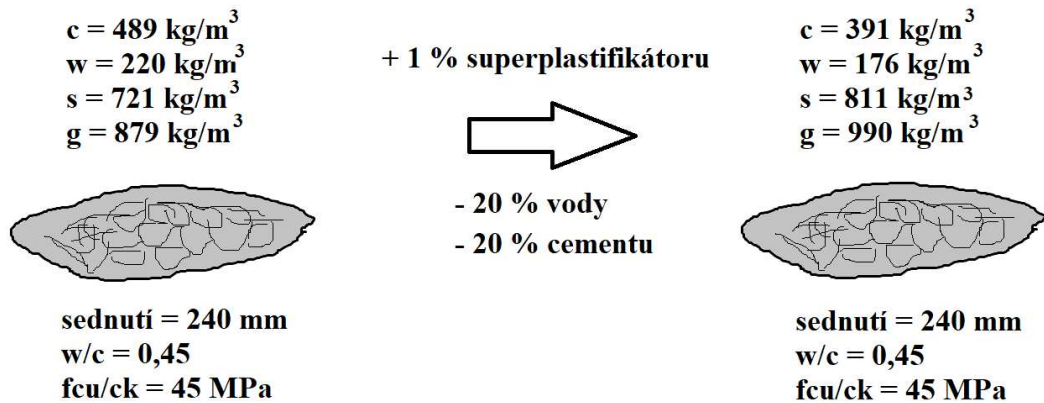
Obrázek 7: Použití plastifikátoru na zvýšení pevnosti., zdroj: [1]

Na obrázku č. 7 můžeme vidět konkrétní využití superplastifikátoru na zvýšení pevnosti z 35 MPa na 45 MPa. Přidáním 1 % superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu a ubráním 20 % vody a zachováním množstvím cementu se sníží porozita a vodní součinitel z 0,55 na 0,44 a sednutí zůstalo 120 mm. Nejen, že

došlo ke zvýšení krychelné pevnosti o 10 MPa, ale díky snížení vodního součinitele se zlepší i trvanlivost betonu.

b. Snížení obsahu cementu

Snížení obsahu cementu může být velmi užitečné, pokud chceme omezit vliv hydratačního tepla, smrštění a dotvarování betonu.

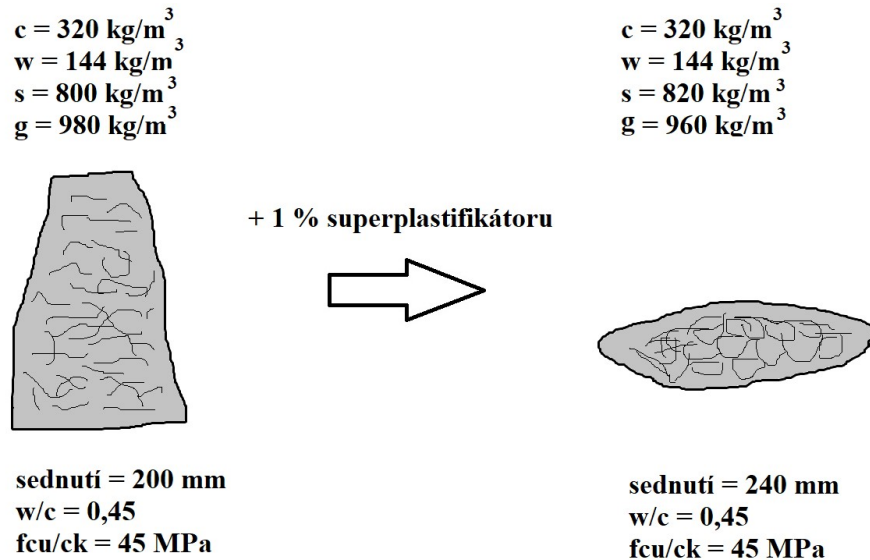


Obrázek 8: Použití superplastifikátoru na snížení obsahu cementu., zdroj: [1]

V tomto případě se sníží teplotního pnutí, které je vyvolané uvolňováním tepla při hydrataci betonu, zároveň se sníží smrštění způsobené vysycháním a napětí při dotvarování. Po přidání superplastifikátoru a současném ubrání, jak vody, tak cementu, dojde ke snížení obsahu cementu, objemový rozdíl je dorovnán navýšením dávky kameniva, nejenom, že beton vykazuje lepší vlastnosti, ale také bude pravděpodobně levnější, protože jak superplastifikátor tak kamenivo jsou daleko lacinější než cement. Všechny ostatní vlastnosti betonu jako je zpracovatelnost a pevnost zůstanou stejné.

c. Zlepšení zpracovatelnosti

Pokud zůstane receptura betonové směsi neměnná a přidá se pouze superplastifikátor dojde k výraznému zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu. To může mít význam například při ukládání betonu do hustě vyztužených a hůře dostupných konstrukcí.



Obrázek 9: Použití superplastifikátoru na zlepšení zpracovatelnosti., zdroj: [1]

Přidáním 1 % superplastifikátoru došlo ke zlepšení zpracovatelnosti a všechny ostatní vlastnosti betonu byly zachovány. Často se v praxi při potřebě zlepšení zpracovatelnosti přistupuje k přidávání vody, která má ale negativní dopad na vlastnosti betonu.

2.5 Vodní součinitel

Ve všech způsobech používání superplastifikačních přísad hraje významnou roli vodní součinitel w . Vodní součinitel je hmotnostní poměr, který udává podíl účinného obsahu vody a hmotnosti cementu.

$$w = \frac{v}{c + k * p}$$

Vzorec 1: Výpočet vodního součinitele., zdroj: [3]

w – vodní součinitel [-]

v – hmotnost účinné vody [kg/m^3]

c – hmotnost cementu [kg/m^3]

k – součinitel zhodnocující vliv přísady (* pro popílek 0,4)

p – hmotnost přísady [kg/m^3]

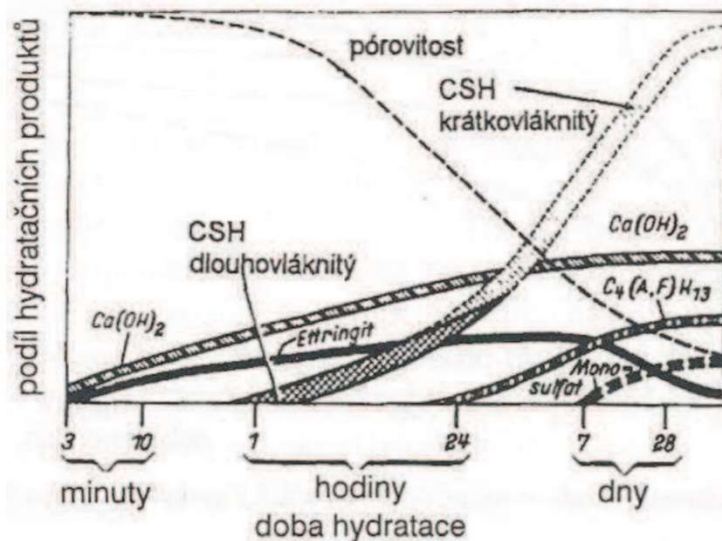
Vodní součinitel se obvykle pohybuje mezi 0,3 až 0,6, obecně platí, že čím nižší je vodní součinitel, tím lepší má beton mechanické vlastnosti.

2.6 Hydratace cementu

Hydratace cementu je nejdůležitějším procesem při výrobě betonu, jednoduše řečeno je hydratace cementu proces, při kterém smícháním cementu s vodou přechází hmota z čerstvé pasty na tvrdou pevnou hmotu, která může být konstrukčním materiálem. Reakce probíhající během hydratace cementu jsou velmi komplexní a přesně je popsat je téměř nemožné. Průběh chemických reakcí probíhající při hydrataci lze v moderních technologiích betonu ovlivňovat pomocí modifikujících přísad, které mohou mít velký vliv na kinetiku hydratace betonu. Chemické reakce cementu s vodou způsobují dvě zásadní změny hmoty, které plynule přechází jedna ve druhou, tím je tuhnutí a tvrdnutí.

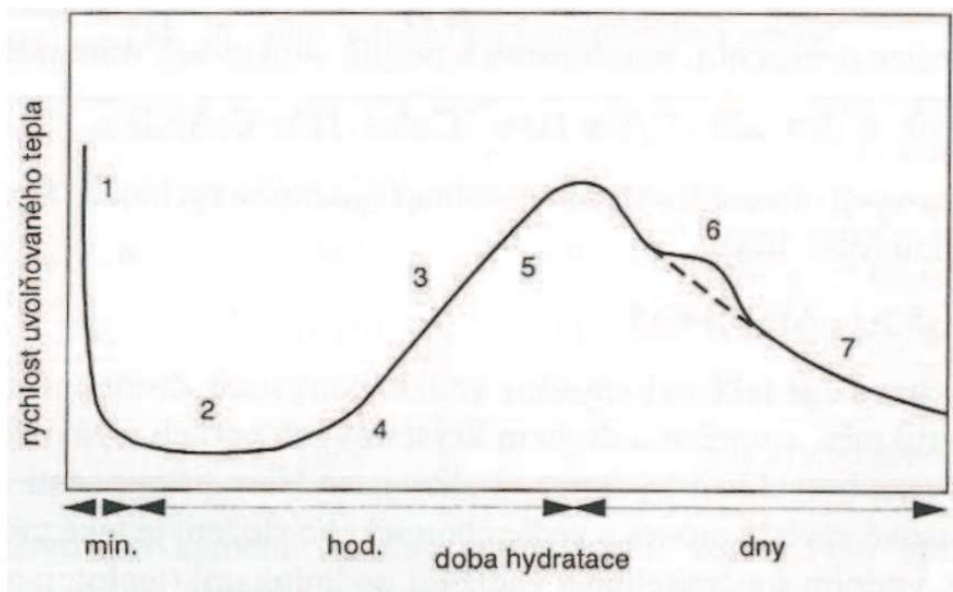
2.6.1 Stádia hydratace cementu

Na obrázku č. 10 můžeme vidět proces hydratace a jednotlivé produkty, které během jejího průběhu vznikají.



Obrázek 10: Produkty hydratace, zdroj: [5]

Současně s přechodem z pastové hmoty na pevný tvrdý materiál dochází k uvolňování hydratačního tepla. Přítomnost hydratačního tepla způsobuje velké hydratační napětí, to může mít vliv na některé vlastnosti betonu jako pevnost nebo jeho trvanlivost, proto se obvykle snažíme vývoj hydratačního tepla spíše snižovat.



Obrázek 11: Rychlost uvolňování tepla v průběhu hydratace., zdroj [5]

Na obrázku č. 11 můžeme vidět postupné uvolňování tepla v průběhu hydratace cementu.

Podle C. Verneta lze proces hydratace rozdělit do pěti stádií:
[5]

2.6.2 Smíchání s vodou

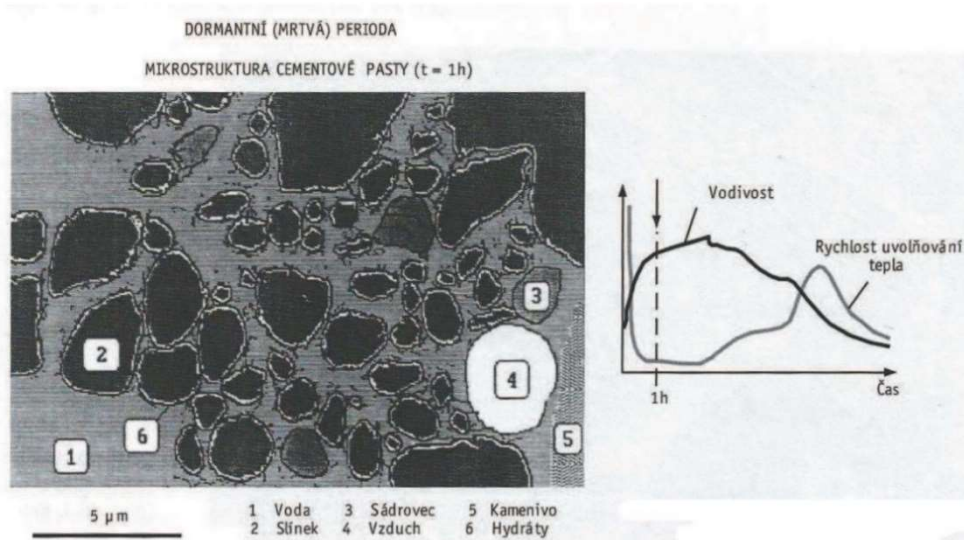
První a zároveň nejrychlejší proces je styk cementu s vodou, k tomu nejčastěji dochází již v míchačce při smáčení zrn cementu. Zde je hydratace exotermická a dochází k uvolňování iontů z různých fází portlandského cementu, v této fázi dochází k velkému uvolňování hydratačního tepla.

V této fázi se zrna cementu začínají obalovat tzv. CSH gelem neboli hydratovaným kalcium-silikátem tvořeným Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ a OH^- ionty, které pochází ze silikátových fází slínku, dále je přítomný ettringit ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), který vniká reakcí iontů Ca^{2+} , $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, SO_4^{2-} a OH^- , které jsou zde díky přítomnosti různých forem síranu vápenatého a z intersticiální fáze.

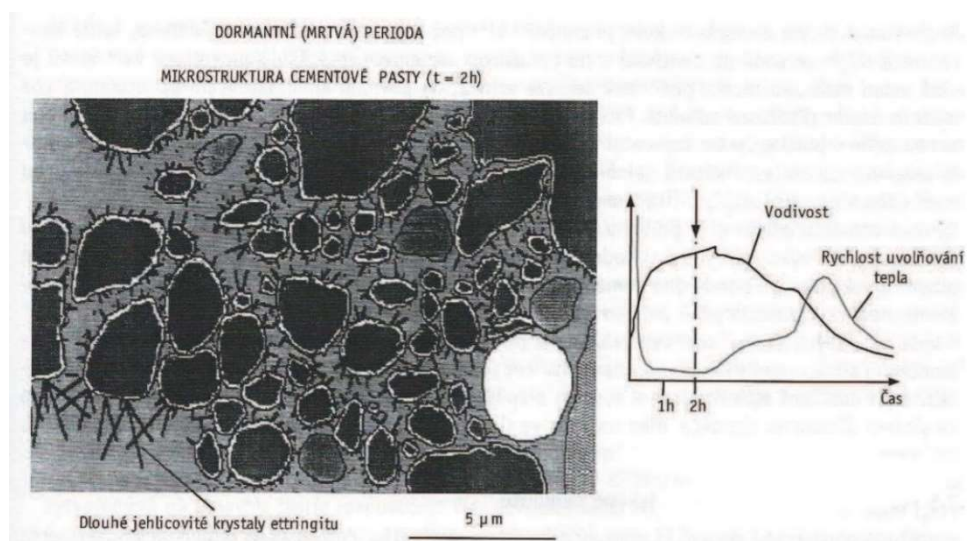
2.6.3 Indukční perioda

Prudce stoupá hodnota pH a v záměsové vodě se koncentrují Ca^{2+} ionty, které společně s hydráty, které se vytvořily na povrchu částic, snižují rozpustnost fází portlandského slínku. V průběhu indukční periody klesá uvolňované hydratační teplo a vzniká malé množství CSH gelu. Může také vznikat malé množství ettringitu, to je ale závislé na vyvážení mezi síranovými ionty a množstvím aluminátových fází.

Na obrázcích č. 12 a 13 můžeme vidět stav a strukturu cementové pasty v průběhu indukční periody.



Obrázek 12: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 1 hodina., zdroj: [5]



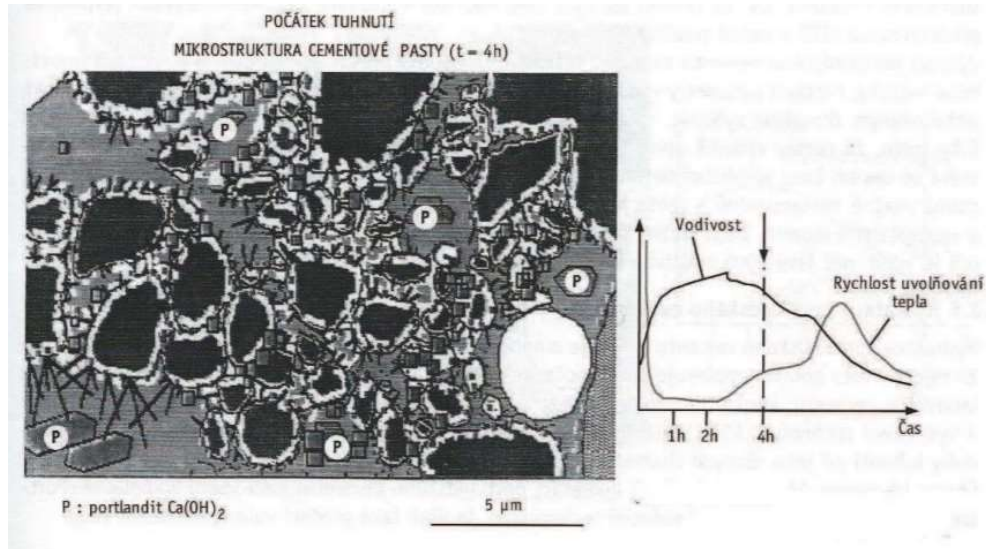
Obrázek 13: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 2 hodiny., zdroj: [5]

Můžeme si všimnout vzniku dlouhých jehlových krystalů ettringitu, zároveň rostoucí vodivosti a snížení rychlosti uvolňovaného tepla.

Záměsová voda se mění na nasycený roztok Ca^{2+} , ale ještě nenastává precipitace portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, částečně také dochází ke flokulaci cementových zrn.

2.6.4 Počátek tuhnutí

Ke konci indukční periody snižuje precipitace portlanditu obsah Ca^+ iontů v roztoku, čímž dochází k aktivaci hydratace.



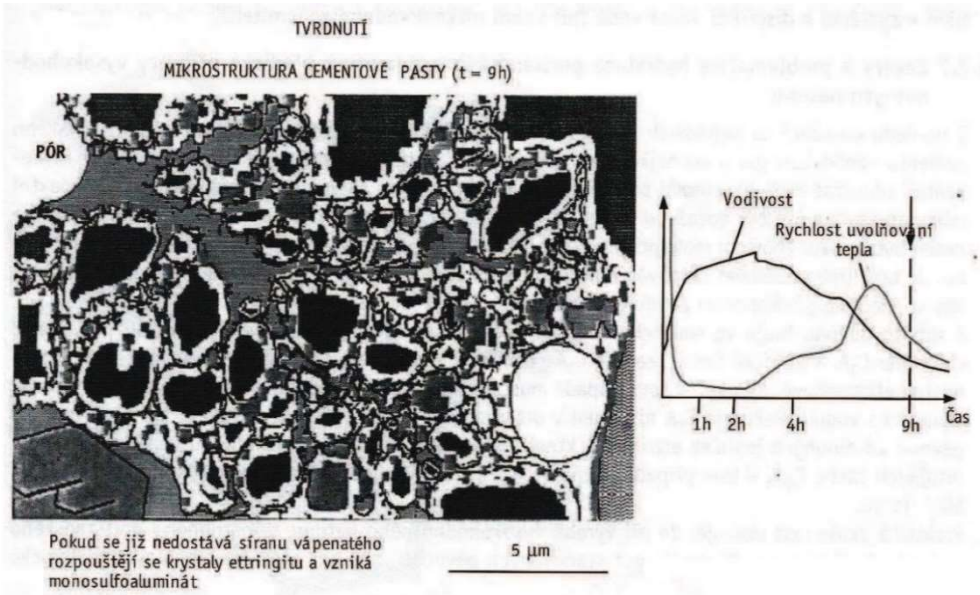
Obrázek 14: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 4 hodiny., zdroj: [5]

Precipitace portlanditu je endotermická reakce, takže spotřebuje část tepla a zároveň vznikají nukleony při vysrážení CH z roztoku, to nastává, pokud je v záměsové vodě nízký obsah $\text{H}_2\text{SO}_4^{2-}$ iontů. Rychlost uvolňování tepla začíná pomalu narůstat a snížení koncentrace OH^- a Ca^{2+} iontů začne znovu způsobovat rozpouštění fází portlandského cementu.

Dále uvolňující se teplo stále narůstá a tento okamžik se obvykle bere jako začátek tuhnutí. Dochází ke vzniku vazeb mezi, které vytváří hydratované silikátové a aluminátové fáze portlandského slínku a tím celá cementová pasta postupně tuhne.

2.6.5 Tvrdnutí

Jelikož během indukční periody, kdy se tvoří ettringit, dochází k vyčerpání většiny SO_4^{2-} iontů, obvykle 9 až 15 hodin po styku vody s cementem, stává se ettringit nestabilní složkou, to vede k jeho rekrystalizaci a vzniku monosulfátu ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$).



Obrázek 15: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 9 hodin, zdroj: [5]

Produkty vzniklé během prvních stádií hydratace nazýváme jako „vnější produkt“, zjednodušeně tyto produkty definuje to, že vznikají směrem ven ze zrn cementu. Konkrétně se jedná o jehličky ettringitu, porézní síť vláknitého CSH gelu, hexagonálních krystalků portlanditu a destičky monosulfátu.

2.6.6 Zpomalení hydratace

K ukončení hydratace portlandského cementu může dojít dvěma způsoby. Buď již neexistuje žádná nezhydratovaná fáze, nebo došlo k zamezení pronikání vody k nezhydratovaným fázím.

Vrstva hydrátů pokrývá v tomto stádiu jednotlivá zrna cementu a nabírá na síle. Zde je přítomen tzv. „vnitřní produkt“, který je definován jako hydratovaná cementová pasta se vzhledem kompaktní amorfni látky.

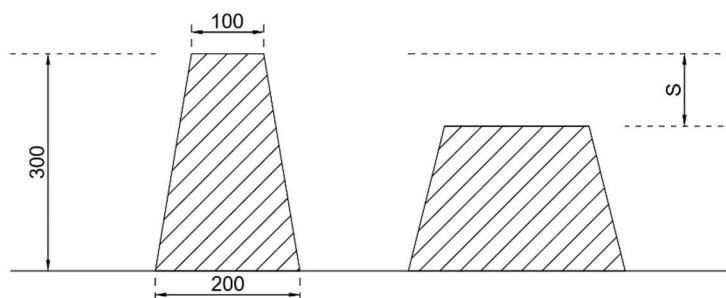
2.7 Popis prováděných zkoušek

2.7.1 Měření konzistence

Pro stanovení konzistence čerstvého betonu se nejčastěji používá zkouška sednutí kužele, alternativou může být zkouška rozlitím.

Postupu na stanovení sednutí Abramsova kužele dle ČSN EN 12350-2: [6]

Podkladní deska a forma ve tvaru komolého kužele se navlhčí. Kužel položený na podkladní desce postupně plníme čerstvým betonem. Současně musíme formu pevně přichytit v podkladní desce, nejčastěji sešlápnutím. Kužel postupně naplňujeme ve 3 vrstvách o přibližně stejné velikosti. Během plnění kužele zároveň beton zhutňujeme pomocí vpichů kovovou tyčí, norma udává 25 vpichů pro každou vrstvu. Kužel plníme, dokud nevznikne nad horní hranou přebytek, který posléze odstraníme příčným pohybem kovovou tyčí. Poté odstraníme kužel pomalým svislým pohybem směrem vzhůru a odečteme výšku nejvyšší vrstvy čerstvého betonu od výšky kužele. Během zkoušky nesmí dojít k porušení nebo usmyknutí, pokud se tak stane je zkouška neplatná.



Obrázek 16: Zkouška sednutí Abramsova kužele, zdroj: [6]

Podle odměřené hodnoty sednutí S rozdělujeme 5 typů konzistence betonu, jednotlivé typy můžeme vidět v tabulce Tabulce 2.

Tabulka 2: Rozdělení podle konzistence, zdroj: [6]

S1	S2	S3	S4	S5
10-40 mm	50-90 mm	100-150 mm	160-210 mm	≥ 220 mm

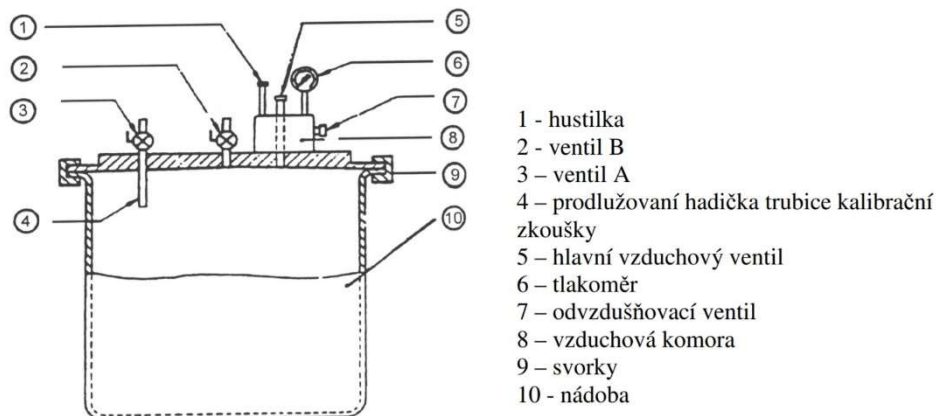
V praxi se pro běžné typy konstrukcí nejčastěji používá konzistence S3, tj. sednutí kužele v rozmezí 100–150 mm.

2.7.2 Měření obsahu vzduchu

Pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu byla zvolena tlaková metoda. Principem zkoušky je porovnání známého objemu vzduchu o známém tlaku s neznámým objemem vzduchu ve vzorku čerstvého betonu. Objemy se porovnávají v uzavřené nádobě a na kruhovém tlakoměru odečítáme procentní podíl vzduchu v čerstvém betonu. Tato metoda je určena pro betonové směsi s maximální velikostí zrna $D_{max} = 63 \text{ mm}$.

Postup na stanovení sednutí Abramsova kužele dle ČSN EN 12350-7: [7]

Do nádoby s minimálním obsahem 5 l se vlije čerstvý beton v tolika vrstvách, aby došlo k úplnému zhutnění. Úplného zhutnění můžeme být docíleno použitím vibračního stolku, ponořením vibrátoru či zhutňovací tyčí. Po zhutnění betonu odebereme pomocí hladítka či zednické lžice přebytečný beton a povrch urovnáme. Po očištění a usušení vnější nádoby pevně připevníme a utěsníme víko nádoby. Po uzavření nádoby utěsníme hlavní vzduchový ventil a přes ventil A naplníme nádobu vodou, dokud se nevytlačí všechen vzduch a voda nezačne protékat ven přes otevřený ventil B. Poté nádobu lehce poklepeme, abychom odstranili zbylé vzduchové bubliny. Do vzduchové komory je posléze potřeba natlačit vzduch, aby se ukazatel tlakoměru vyrovnal na nulovou hodnotu. Uzavřeme oba ventily A i B a po dosažení rovnovážného stavu můžeme z tlakoměru odečíst obsah vzduchu. Po změření hodnoty musíme nejprve otevřít ventil A a B, aby došlo k uvolnění tlaku a po očištění nádoby můžeme provádět další měření



Obrázek 17: Schéma nádoby na měření obsahu vzduchu tlakovou metodou., zdroj: [7]

2.7.3 Stanovené objemové hmotnosti

Objemová hmotnost čerstvého betonu může být stanovena současně při měření obsahu vzduchu v betonu, anebo při odběru krychlí na stanovení tlakové pevnosti. Beton nalijeme do vodotěsné nádoby o známém objemu, zhutníme a následně zvážíme a odečteme váhu samotné nádoby. [8]

Objemová hmotnost se stanoví ze vztahu:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Vzorec 2: Výpočet objemové hmotnosti, zdroj [8]

Kde:

D = objemová hmotnost betonu [kg/m³]

m₁ = hmotnost prázdné nádoby [kg]

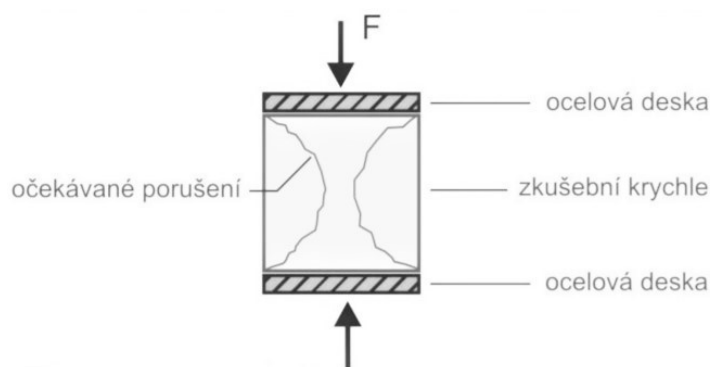
m₂ = hmotnost nádoby s betonem [kg]

V = objem nádoby [m³]

2.7.4 Pevnost v tlaku

Po odebrání zkušebních krychlí na stavbě byly druhý den odvezeny do zkušební laboratoře, kde byla provedena zkouška v tlaku podle normy ČSN EN 12390-3. [9]

Princip zkoušky: Zkušební krychle zvážíme a změříme délku všech tří hran., poté se zkušební krychle vloží do zkušebního lisu (krychli musíme osadit kolno na směr hutnění vzorku), kde jsou postupně zatěžovány až do svého porušení. Po provedení zkoušky se z maximálního zatížení, při kterém došlo k porušení krychle a z rozměrů krychle podle vztahu [Vzorec 3] tlaková pevnost krychle. V našem případě měly krychle hrany délky 150 mm.



Obrázek 18: Zkouška pevnosti v tlaku, zdroj [17]

Tlaková pevnost se stanoví ze vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [MPa]$$

Vzorec 3: Výpočet tlakové pevnosti, zdroj [9]

Kde:

f_c = tlaková pevnost v MPa [N/mm²]

F = maximální zatěžovací síla při které dojde k porušení [N]

A_c = zatěžovaná plocha zkušebního tělesa [mm²]

3. Experimentální část

V experimentální části bude proveden praktický pokus, kde dva různé druhy superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů budou přidávány do čerstvého betonu ve 3 různých variantách. V první variantě budeme přidávat veškeré množství superplastifikátoru najednou v běžném pořadí míchání přímo do míchačky. V této variantě se přidá superplastifikátor s ostatními přísadami až po kamenivu a smíchání vody s cementem. V druhé variantě zachováme stejnou recepturu betonu a pouze ubereme množství superplastifikátoru přidaného při míchání betonu a odebrané množství posléze doplníme na stavbě po příjezdu autodomíchače. Ve třetí variantě se opět zachová stejná receptura a veškeré množství superplastifikátoru se bude stejně jako ve variantě první přidávat najednou při míchání. Tentokrát se však prohodí pořadí přidávání jednotlivých složek. Do kameniva se přidá voda současně s přísadami a příměsemi a až po smíchání těchto složek se přidá cement.

Ve všech 3 variantách odebereme vzorky a provedeme na nich zkoušky popsané v teoretické části [3.]. Budeme zkoumat, změnu zpracovatelnosti čerstvého betonu po namíchání, po příjezdu autodomíchače na stavbu a v časech 90 a 150 minut od ukončení procesu míchání. Dále budeme monitorovat obsah vzduchu v čerstvém betonu a jednotlivé objemové hmotnosti. Z každé betonové směsi bude odebráno 5 krychlí o hraně 150 mm a budeme zkoušet krychelnou tlakovou pevnost a její průběh od 2 do 28 dnů. U porovnávání naměřených hodnot se poté zaměřím na porovnání účinnosti jednotlivých plastifikátorů a současně na vliv jednotlivých variant, kdy byl superplastifikátor přidán.

3.1 Porovnávání superplastifikační přísady

Obě superplastifikační přísady, které budeme používat a porovnávat jsou na bázi polykarboxylátů. V tabulce č. 3 můžeme vidět jejich vlastnosti garantované výrobcem.

Tabulka 3: Specifikace superplastifikačních přísad

Superplastifikátor X		Superplastifikátor Y	
Základní charakteristiky	Vlastnost	Základní charakteristiky	Vlastnost
Vzhled	Červenohnědá homogenní látka	Vzhled	Nažloutlá homogenní látka
Hustota	1060 ± 20 kg/m ³	Hustota	1060 ± 20 kg/m ³
Obsah sušiny	29,0 ± 1,5 hm. %	Obsah sušiny	33,0 ± 3,0 hm. %
pH	5-7	pH	4,5 ± 0,5
Maximální obsah chloridů	0,1 % hm.	Maximální obsah chloridů	0,1 % hm.
Maximální obsah alkálií	2,0%	Maximální obsah alkálií	1,0%
1) při stejné konzistenci		1) při stejné konzistenci	
Redukce vody	Ve zkušební směsi ≥ 12 % ve srovnání s kontrolní směsí	Redukce vody	Ve zkušební směsi ≥ 12 % ve srovnání s kontrolní směsí
Pevnost v tlaku po 1 dnu	Zkušební směs ≥ 140 % kontrolní směsi	Pevnost v tlaku po 1 dnu	Zkušební směs ≥ 140 % kontrolní směsi
Pevnost v tlaku po 28 dnech	Zkušební směs ≥ 115 % kontrolní směsi	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Zkušební směs ≥ 115 % kontrolní směsi
Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi	Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi
2) při stejném vodním součiniteli		2) při stejném vodním součiniteli	
Zvětšení konzistence	Zvětšení sednutí ≥ 120 mm z původních (30 ± 10) mm	Zvětšení konzistence	Zvětšení sednutí ≥ 120 mm z původních (30 ± 10) mm
Zachování konzistence	30 minut po přidání přísady neklesne konzistence zkušební směsi pod hodnotu původní konzistence kontrolní směsi	Zachování konzistence	30 minut po přidání přísady neklesne konzistence zkušební směsi pod hodnotu původní konzistence kontrolní směsi
Pevnost v tlaku po 28 dnech	Zkušební směs ≥ 90 % kontrolní směsi	Pevnost v tlaku po 28 dnech	Zkušební směs ≥ 90 % kontrolní směsi
Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi	Obsah vzduchu v čerstvém betonu	Ve zkušební směsi maximálně o 2 objemová % více než v kontrolní směsi

Superplastifikační přísady X a Y se liší pouze obsahem sušiny, hodnotou pH a obsahem alkálií, jejich vliv na vlastnosti betonu by ale podle toho, co uvádí výrobce, měl být totožný. Tento fakt bude jednou z věcí, kterou budeme v průběhu měření ověřovat.

3.2 Přehled receptur

U všech variant zůstává receptura na výrobu betonu stejná, mění se pouze množství a typ superplastifikátoru. Drobné změny v množství ostatních složek bude zanedbáno, protože je technologicky téměř nemožné zachovat jejich konstantní množství.

Specifikace zkoušeného betonu podle ČSN EN 206-1 je
C25/30 – X0, XC1-2 – Cl 0,2 – Dmax 22 mm – S3,

Kde:

C25/30 = charakteristická válcová pevnost v tlaku $f_{ck, cyl} = 25$ Mpa /
charakteristická krychelná pevnost v tlaku $f_{ck, cube} = 30$ Mpa

X0, XC1-2 = stupeň vlivu prostředí, konkrétně X0 = beton bez
nebezpečí koroze nebo narušení a XC1-2 = beton s nebezpečím
koroze vlivem karbonatace

Cl 0,2 = 2,0% obsah chloridů z hmotnosti cementu

Dmax 22 = maximální velikost použitého kameniva je 22 mm

S3 = konzistence betonu v rozmezí 100-150 mm

V tabulkách č. 4 až 6 je uvedena receptura betonu pro jednotlivé varianty:

1. Varianta – referenční receptura

Tabulka 4: Receptura pro 1. variantu

1. Varianta		
Složka	Typ	Množství [kg/m3]
Kamenivo	0/4–11/22	1760
Cement	CEM II 32,5	340
Popílek	-	25
Vápenec	vápenecový filler	25
Voda	čistá	185
Superplastifikátor	X/Y	1,3

2. Varianta – dodání superplastifikátoru na stavbě

Tabulka 5: Receptura pro 2. variantu

2. Varianta		
Složka	Typ	Množství [kg/m3]
Kamenivo	0/4–11/22	1760
Cement	CEM II 32,5	340
Popílek	-	25
Vápenec	vápenecový filler	25
Voda	čistá	185
Superplastifikátor	X/Y	1
Superplastifikátor dodaný na stavbě	X/Y	0,3

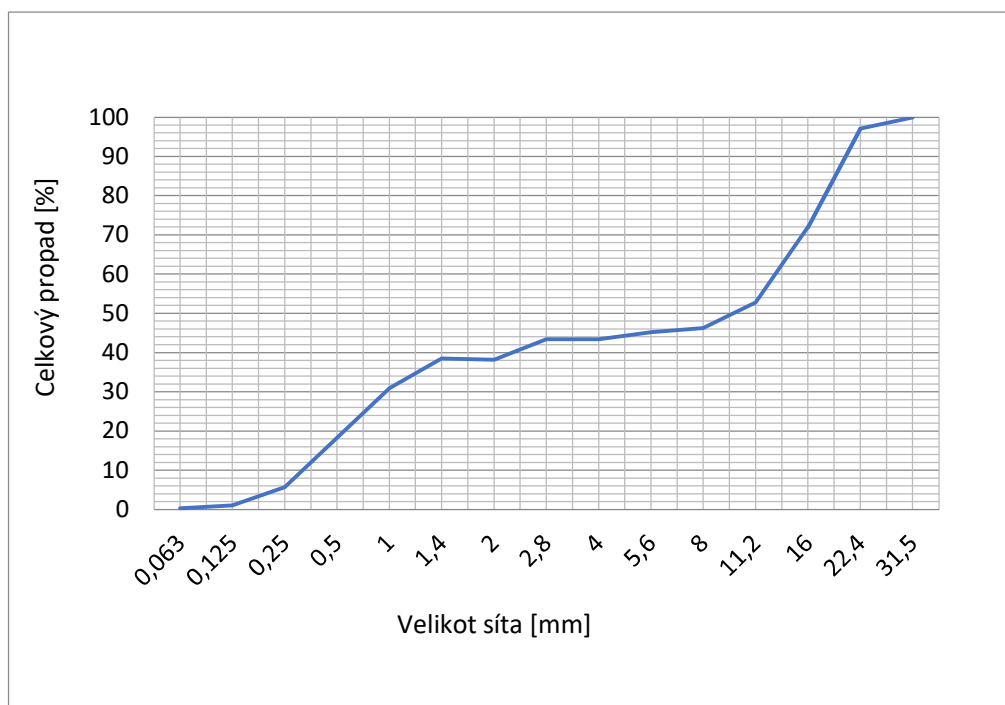
3. Varianta – změna pořadí při míchání

Tabulka 6: Receptura pro 3. variantu

3. Varianta		
Složka	Typ	Množství [kg/m ³]
Kamenivo	0/4–11/22	1760
Cement	CEM II 32,5	340
Popílek	-	25
Vápenec	vápencový filler	25
Voda	čistá	185
Superplastifikátor	X/Y	1,3

3.3 Křivka zrnitosti

V recepturách jednotlivých variant se mění pouze druh superplastifikátoru, množství cementu, vody a kameniva zůstává stejné. Tím pádem i poměr smíchaného kameniva bude stejný a s ním i křivka zrnitosti.

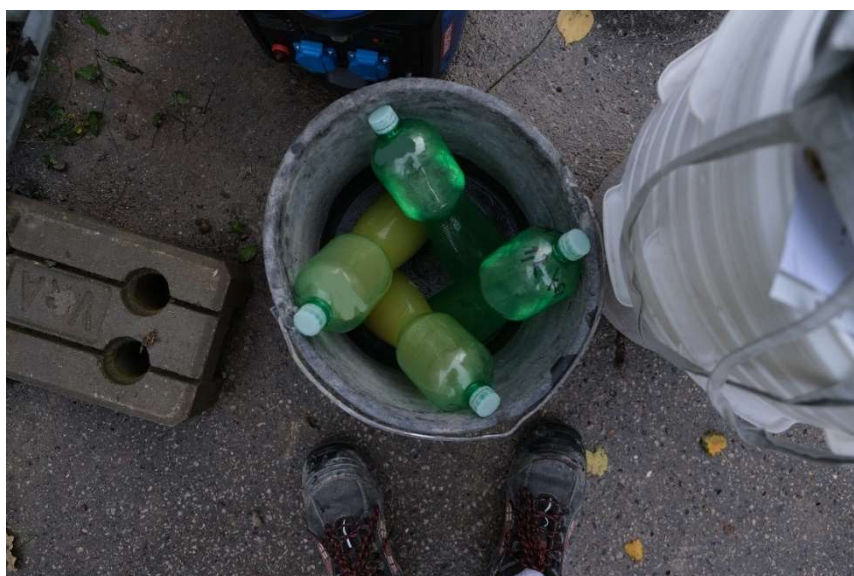


Graf 2: Graf křivky zrnitosti

3.4 Postup měření

Veškeré měření a odběr vzorků bylo provedeno během jednoho dne, aby byly zachované co možná nejstejnější podmínky okolního prostředí a vlhkost kameniva, která by mohla mít také vliv na naměřené hodnoty. Měření a odběr vzorků probíhal na dvou stanovištích zároveň, jedno bylo přímo na betonárce konkrétně na betonárce společnosti TBG Metrostav s.r.o. v Radlicích, kde se měřilo bezprostředně po ukončení procesu míchání a zbytek měření se prováděl přímo na stavbě nedaleko betonárky. Celý proces měření a odběru vzorků se prováděl během reálné betonáže stropní konstrukce, hlavním důvodem bylo mít co nejautentičtější podmínky, které budou mít reálnou vypovídající hodnotu.

Před samotným měření byla potřeba připravit a navážit dávky superplastifikátoru, které byly přidávány dodatečně přímo na stavbě.



Obrázek 19: Připravené dodatečné dávky superplastifikátoru.



Obrázek 3: Zkouška sednutí



Obrázek 24: Výsledky měření obsahu vzduchu



Obrázek 22: Měření objemové hmotnosti

Měření bylo zahájeno první variantou, tedy s referenční recepturou, kde se veškeré množství superplastifikátoru přidalo po smíchání cementu s vodou přímo do míchačky. Během procesu míchání bylo monitorováno množství korekční vody, které bude zohledněno při porovnávání výsledků měření. Po ukončení procesu míchání se provedla zkouška sednutí Abramsova kužele, změřil se obsah vzduchu v čerstvém betonu, zvážila nádoba, aby se mohla dopočítat objemová hmotnost, zaznamenala se teplota betonu a prostředí a odebralo se celkem 5 krychlí.

Po příjezdu autodomíchávače na stavbu se opět změřilo sednutí Abramsova kužele, obsah vzduchu v betonu, objemová hmotnost, zaznamenala teplota prostředí a betonu a odebralo 5 krychlí.



Obrázek 23: Autodomíchávač na stavbě s čerpadlem v pozadí.



Obrázek 24: Stanoviště měření přímo na stavbě.

Po naměření hodnot a odebrání krychlí na zkoušku tlakové pevnosti se zbytek betonu zakonzervoval do kýblů, které se popsali a označili, aby mohla po 90 a 150 minutách od ukončení míchacího procesu opakována zkouška sednutí Abramsova kužele.



Obrázek 25: Zkouška sednutí Abramsova kužele po 150 minutách.

Během druhé varianty bylo nutné po příjezdu autodomícháváče na stavbu dodat dávku superplastifikátoru, která byla ubrána při míchacím procesu. U obou plastifikačních přísad bylo ubráno 2,4 kg z celkových 10,4 kg

na objem bubnu autodomíchávače, který činí 8 m³. Po přidání přísady se musel superplastifikátor promíchat v autodomíchávači dalších 10 minut před dalším měřením a odběrem vzorků. Po promíchání se opět provedlo stejné měření jako v první variantě.



Obrázek 26: Nádoba tlakového přístroje na zkoušku obsahu vzduchu.



Obrázek 27: Odečtení sednutí kužele

Třetí varianta až na prohození složek při míchacím procesu probíhala totožně s variantou první.

Celé měření bylo organizačně poměrně komplikované a časově náročné. Jednotlivé varianty se po prvním měření začaly vzájemně prolínat a bylo nutné hlídat návaznosti a časy jednotlivých měření. Odebrané krychle byly označeny a posléze odvezeny do laboratoře, kde se prováděla zkouška tlakové pevnosti.



Obrázek 28: Krychle skladované na stavbě v průběhu měření.

Měření bylo zahájeno přípravami kolem 7:00 ráno a poslední hodnota byla zaznamenána okolo 14:00 odpoledne, celkem tedy zabralo nepřetržitě 7 hodin, během kterých bylo naměřeno 72 hodnot a odebráno 60 krychlí.

3.5 Harmonogram měření

Tabulka 7: Harmonogram měření

1.-5. minuta	Byla zaznamenána teplota prostředí a betonu, byla provedena zkouška sednutí Abramsova kužele, změřil se obsah vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou, byla zvážena forma s a bez betonu, aby se později mohla dopočítat objemová hmotnost a bylo odebráno 5 krychlí o hraně 150 mm.
30.-40. minuta	Do autodomíchávače byl přidán superplastifikátor s následným dodatečným promícháváním v bubnu autodomíchávače, které trvalo 10 minut. (*tento krok pouze ve 2. variantě)
40.-45. minuta	Byla zaznamenána teplota prostředí a betonu, byla provedena zkouška sednutí Abramsova kužele, změřil se obsah vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou, byla zvážena forma s a bez betonu, aby se později mohla dopočítat objemová hmotnost a bylo odebráno 5 krychlí o hraně 150 mm. Zbytek odebraného betonu byl zakonzervován do kýble pro budoucí zkoušky.
90. minuta	Byla provedena zkouška sednutí Abramsova kužele.
150. minuta	Byla provedena zkouška sednutí Abramsova kužele.

Tento postup se prováděl ve 3 různých variantách pro dvě různé superplastifikační přísady.

3.6 Výsledky měření

Naměřené výsledky budou v této kapitole rozdělené do jednotlivých skupin podle zkoumaných vlastností a vzájemně porovnávány.

3.6.1 Zpracovatelnost

V tabulce č. 8 můžeme vidět veškeré hodnoty sednutí Abramsova kužele, které jsme během měření zaznamenali.

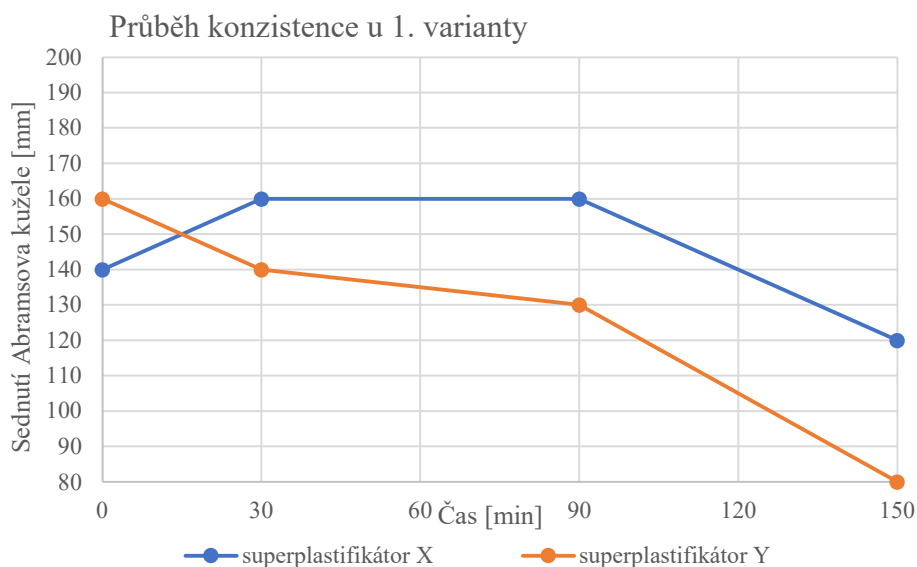
Tabulka 8: Naměřené hodnoty sednutí

Varianta	Přísada	Sednutí [mm]			
		na betonárce	na stavbě	po 90 min	po 150 min
1.	X	140	160	160	120
	Y	160	140	130	80
2.	X	90	180	170	110
	Y	100	160	160	140
3.	X	160	200	180	170
	Y	160	180	190	160

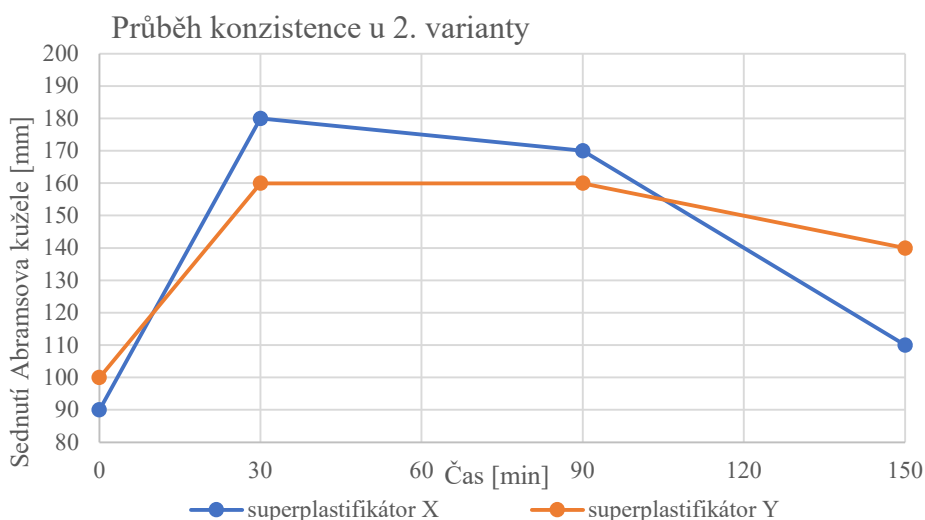
Na první pohled si můžeme všimnout, že nejhůř po 150 minutách od ukončení procesu míchání dopadla přísada Y v první variantě, tedy při běžném míchání, kde je veškeré množství superplastifikátoru smícháno s ostatními složkami již v míchačce. Naopak nejlépe svou zpracovatelnost čerství beton zachoval v průběhu třetí varianty, kde také bylo veškeré množství superplastifikátoru přimícháno již v míchačce, tentokrát ještě před přidáním cementu.

V grafu č. 3, kde je vyznačen průběh konzistence v závislosti na čase v průběhu první varianty můžeme pozorovat, že obě přísady X i Y mají podobnou tendenci zhoršování zpracovatelnosti. V případě superplastifikátoru X je patrné, že během cesty transportbetonu v autodomíhávači došlo k mírnému zlepšení zpracovatelnosti, to mohlo být pravděpodobně způsobené dodatečným promícháváním při transportu betonu z betonárny na stavbu. Opačný jev nastal u superplastifikátoru Y, kde došlo k mírnému zhoršení zpracovatelnosti.

Přísada X se v porovnání s přísadou Y v této variantě jeví jako efektivnější pro zachování zpracovatelnosti. V průběhu se zpracovatelnost držela na hranici stupně S3 a S4, kdežto u přísady Y po 150 minutách klesla pod hranici S3.

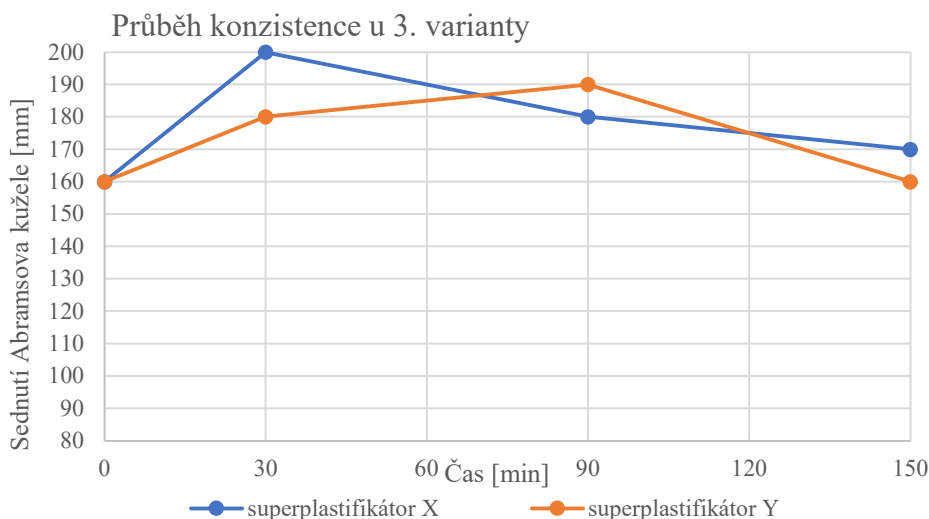


Graf 3: Průběh konzistence v závislosti na čase u 1. varianty



Graf 4: Průběh konzistence v závislosti na čase u 2. varianty

V druhé variantě, kdy jsme dávkování rozdělili do dvou etap a ubrané množství superplastifikátoru dodali až na stavbě si na grafu č. 4 můžeme všimnout, že se přísada X v počátku jevila jako efektivnější. Avšak posléze zpracovatelnost klesla a z pohledu zachování zpracovatelnosti se jeví přísada Y jako spolehlivější. Obě přísady přesto pokles zpracovatelnosti zachovaly a stupeň konzistence zůstal v mezích S3.



Graf 5: Průběh konzistence v závislosti na čase u 3. varianty

U třetí varianty, kde jsme postupovali podobně jako u první varianty s rozdílným pořadím smíchávání jednotlivých složek. Konkrétně v pořadí kamenivo + voda + přísady a příměsi + cement. Tato varianta se jeví jako neefektivnější. Nejenom že se zpracovatelnost drží i po 150 minutách stále na stupních konzistence S4, ale v porovnání s předchozími variantami zaznamenává daleko menší výkyvy hodnot.

Oba druhy superplastifikátorů s výjimkou přísady Y v první variantě zachovaly zpracovatelnost betonu v mezích stupně S3 po dobu 150 min od ukončení míchacího procesu.

Přísada X vykazuje lepší výsledky a efektivitu. Nejenom, že ve všech třech variantách byla zpracovatelnost nejvyšší, ale také jí dokázala udržet po delší dobu. Jediný případ, kdy se jeví přísada Y jako lepší, je při dodatečném dodávání superplastifikátoru na stavbě, v této situaci byla schopná udržet zpracovatelnost déle než přísada X.

3.6.2 Pevnost

Při vyhodnocování pevností jednotlivých vzorků budeme porovnávat krychlené pevnosti v tlaku. Celkem bylo odebráno 60 krychlí o hraně $a = 150$ mm. Z každého autodomíchače jsme odebrali 5 krychlí na betonárce bezprostředně po ukončení míchacího procesu a 5 krychlí po příjezdu autodomíchače na stavbu. To bylo provedeno pro každou variantu a každý druh superplastifikační přísady.

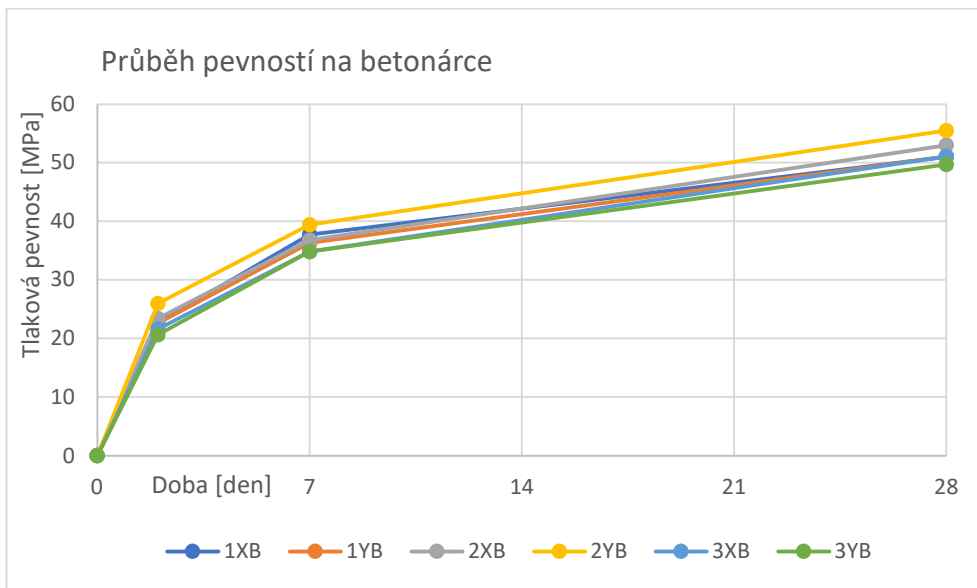
Z 5 odebraných krychlí jsme stlačovali jednu po 2 dnech, jednu po 7 dnech a zbylé 3 po 28 dnech. Jednotlivé hodnoty tlakových pevností jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Tabulka 9: Tlakové pevnosti

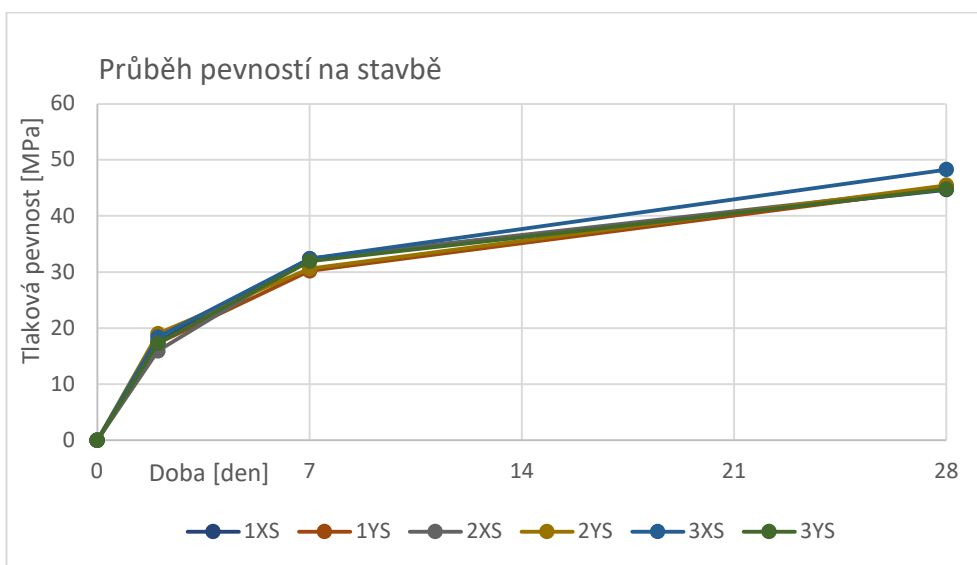
Varianta	Přísada	Tlaková pevnost [MPa]					
		R2		R7		R28	
		betonárna	stavba	betonárna	stavba	betonárna	stavba
1.	X	22,7	17,6	37,7	32,4	51,0	44,7
	Y	22,6	17,3	36,3	30,2	51,1	45,0
2.	X	23,4	15,9	36,8	32,4	53,0	45,1
	Y	26,0	19,0	39,4	30,6	55,5	45,5
3.	X	21,6	18,4	34,8	32,4	51,1	48,3
	Y	20,6	17,3	34,8	31,9	49,7	44,8

Z tabulky č. 9 můžeme vidět, že hodnoty krychle odebrané na betonárce mají v porovnání s těmi ze stavby vyšší pevnost ve všech případech, tento jev je mohl být způsoben rozdílnými podmínkami při jejich skladování před stlačením, přesto by se ale pevnosti měli po 28 dnech vyrovnat. Krychle ze stavby a z betonárny byly stlačované v jiných laboratořích a je tedy pravděpodobnější, že rozdíl hodnot je způsoben rozdílným typem stlačovacího lisu. Krychle odebrané na betonárce zůstávaly v interiéru a posléze byly odvezeny do laboratoře, kdežto ty na stavbě zůstaly přes noc venku v igelitových pytlích a až potom byly odvezeny do laboratoře.

Z toho důvodu byl průběh pevností v grafech oddělen na měření na betonárce a na stavbě.



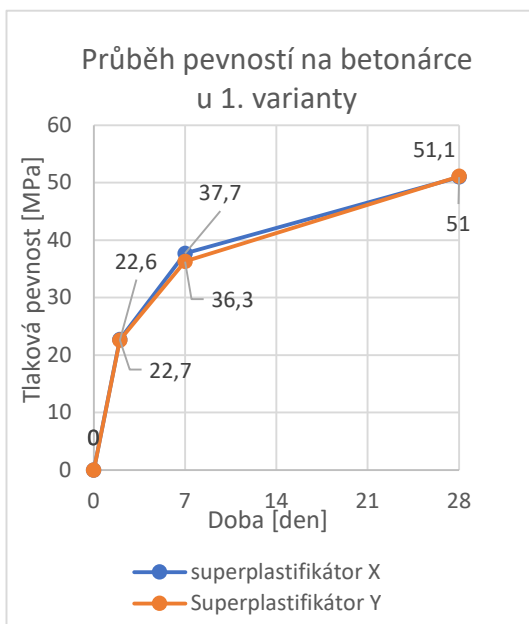
Graf 6: Průběh pevností na betonárce



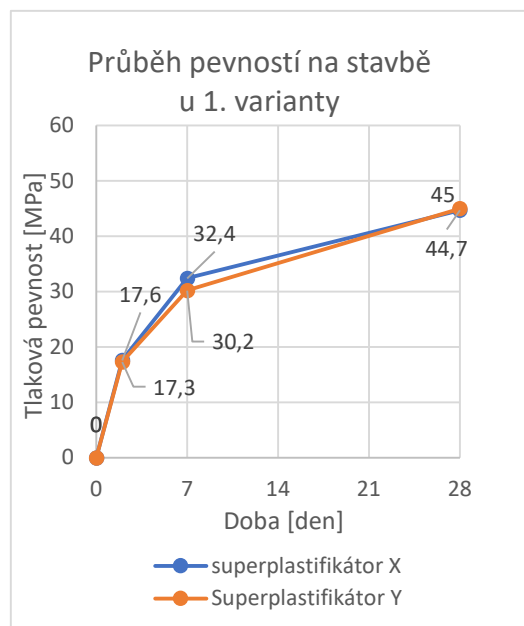
Graf 7: Průběh pevností na betonárce

Z grafů č. 6 a 7 můžeme vidět, že průběh pevností je ve všech případech téměř totožný. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou je u pevností po 28 dnech 5,8 a 3,6 MPa, což je poměrně zanedbatelný rozdíl. Referenční beton měl mít krychelnou pevnost po 28 dnech 30 MPa a nejmenší naměřená hodnota je 44,7 MPa, což s přehledem požadavek splňuje.

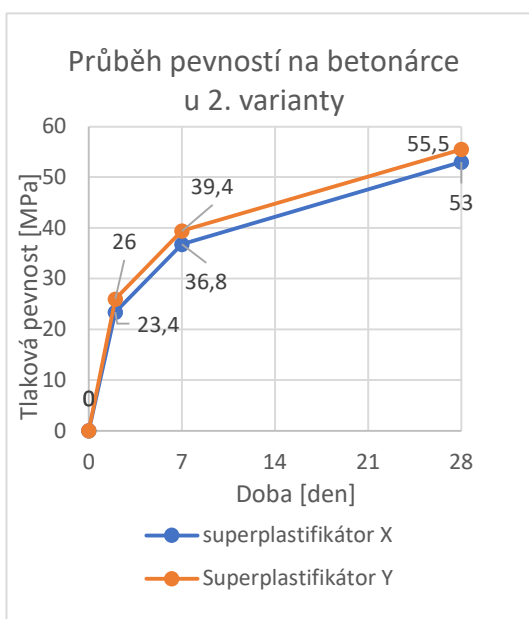
V grafech č. 8 až 13 můžeme pozorovat průběhy pevností v jednotlivých variantách s použitím rozdílných plastifikačních přísad.



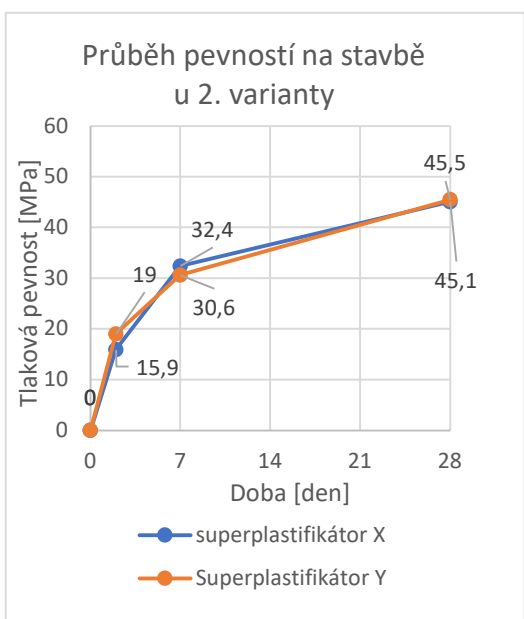
Graf 8: Průběh pevností na betonárce u 1. varianty



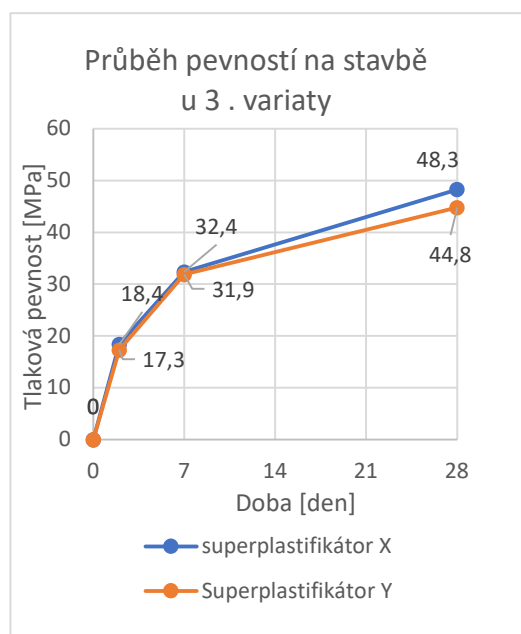
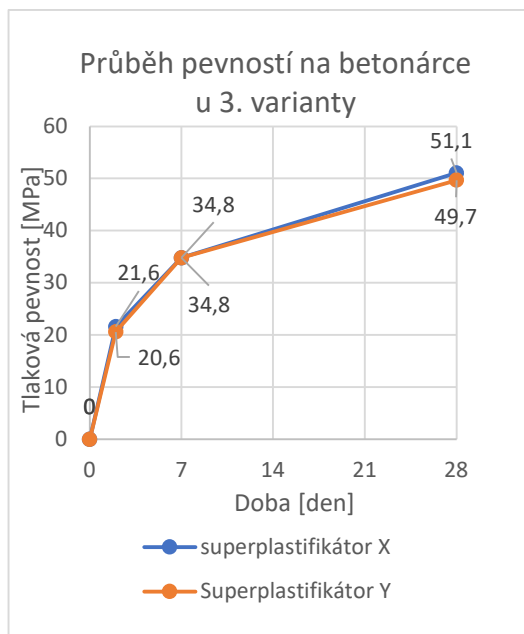
Graf 9: Průběh pevností na stavbě u 1. varianty



Graf 10: Průběh pevností na betonárce u 2. varianty



Graf 11: Průběh pevností na stavbě u 2. varianty



Graf 12: Průběh pevností na betonárce u 3. varianty Graf 13: Průběh pevností na stavbě u 3. varianty

Z grafů č. 8 až 13 je patrné že ani varianta ani druh přísady nemá výrazný vliv na průběh tlakových pevností. Tento fakt je dán pravděpodobně tím, že se ve všech případech jedná o stejnou recepturu, mění se pouze pořadí smíchávání jednotlivých složek.

Pokud mají přísady X a Y vliv na tlakovou pevnost, je tento vliv téměř totožný a při výběru přísad je tedy výhodnější upřednostnit jejich vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu.

3.6.3 Obsah vzduchu

Obsah vzduchu je významný zejména pro betony vystavené vlivu mrazu a lze ho dodatečně upravovat použitím provzdušňovacích přísad. Faktorů, které ovlivňují obsah vzduchu v čerstvém betonu je hned několik, většina z nich souvisí se složením cementu.

V tabulce č. 10 můžeme vidět naměřené hodnoty (jedná se o obsah vzduchu v čerstvém betonu, nikoliv mikroskopický).

Tabulka 10: Obsah vzduchu v čerstvém betonu

Varianta	Přísada	Obsah vzduchu [%]	
		Na betonárce	Na stavbě
1.	X	1,9	1,7
	Y	2,2	1,7
2.	X	2	1,5
	Y	2	2
3.	X	1,9	1,5
	Y	1,9	1,8

Použití superplastifikátoru může mít v některých případech za následek zvýšení obsahu vzduchu, tento problém se obvykle řeší zvýšenou dávkou provzdušňovací přísady. Dalším faktorem ovlivňujícím obsah vzduchu může být doba a intenzita míchání.

V tabulce č. 9 můžeme pozorovat menší pokles obsahu vzduchu během cesty na stavbu, který je pravděpodobně způsoben dodatečným promícháním a lepším rozptýlením přísad v autodomíchači. Obecně platí, že čím je nižší obsah vzduchu v čerstvém vzduchu, tím vyšších pevností dosahuje po zatvrdnutí.

Průměrná hodnota obsahu vzduchu na betonárce je 2,0 % a na stavbě 1,7 %, typ přísady ani varianta se zdá nemají výraznější vliv na obsah vzduchu v čerstvém betonu.

3.6.4 Objemová hmotnost

V tabulce č. 11 si můžeme všimnout, že objemová hmotnost čerstvého betonu při cestě z betonárny na stavbu, která trvala přibližně 30 minut, mírně stoupá. Tento jev způsobuje průběžné vypařování vody a tím i její hmotnosti, ve směsi se tím zvyšuje podíl tuhých složek, které mají vyšší objemovou hmotnost. Dalším faktorem ovlivňujícím objemovou hmotnost čerstvého betonu může být například metoda a kvalita zhutňování před vážením vzorku.

Tabulka 11: Objemová hmotnost čerstvého betonu

Varianta	Přísada	Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	
		Na betonárce	Na stavbě
1.	X	2344	2356
	Y	2338	2360
2.	X	2352	2366
	Y	2358	2358
3.	X	2349	2360
	Y	2344	2355

Stejně jako tomu bylo u pevnosti a obsahu vzduchu opět nehraje druh přísady ani varianta významnou roli.

V tabulce č. 12 můžeme vidět objemové hmotnosti ztvrdlého betonu v době 2, 7 a 28 dní.

Tabulka 12: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Varianta	Přísada	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m ³]		
		R2	R7	R28
1.	X	2370	2370	2390
	Y	2370	2360	2380
2.	X	2390	2380	2390
	Y	2400	2390	2410
3.	X	2400	2410	2410
	Y	2380	2390	2390

Můžeme pozorovat navýšení objemové hmotnost v porovnání s čerstvým betonem, které je způsobeno úbytkem vody a postupnou krystalizací betonu. V hodnotách nedochází k žádným výkyvům a můžeme tedy předpokládat standardní průběh hydratačních procesů.

3.6.5 Teplota prostředí a čerstvého betonu

Okolní teplota může mít významný vliv na vlastnosti betonu obzvláště v počátečních stádiích, proto se receptury upravují pro letní a zimní období. Pokud teplota klesne pod 5 °C může dokonce dojít k zastavení hydratačního procesu.

V tabulce č. 13 můžeme vidět, že hodnoty okolního vzduchu v průběhu betonáže byly s přehledem nad touto limitní hodnotou. Na stavbě bylo lehce chladněji pravděpodobně, protože šlo o otevřený prostor, kde byl větší vliv povětrnostních podmínek a kvůli vyšší nadmořské výšce.

Tabulka 13: Teploty vnějšího vzduchu

Varianta	Přísada	Teplota prostředí [°C]	
		Na betonárce	Na stavbě
1.	X	13,6	11,7
	Y	12,2	12
2.	X	13,8	12,1
	Y	12,4	11,5
3.	X	13,5	11,9
	Y	13,5	11,7

Při nízkých teplotách může dojít ke snížení počátečních pevností, což může způsobovat problémy při odbedňování a dalších navazujících pracích.

V tabulce č. 14 můžeme vidět naměřené teploty čerstvého betonu v průběhu měření a odběru vzorků.

Tabulka 14: Teploty čerstvého betonu

Varianta	Přísada	Teplota čerstvého betonu [°C]	
		Na betonárce	Na stavbě
1.	X	17,1	16,9
	Y	17,6	18
2.	X	16,7	19,9
	Y	17,3	17,8
3.	X	17,2	17,5
	Y	16,9	16,7

Hydratační teplo vyvíjející se v čerstvém betonu se pohybuje v mezích od 16,7 °C do 19,9 °C a nedochází k žádným výkyvům.

3.6.6 Odpor konzistoměru

Princip: Odpor konzistoměru je hodnota naměřena přímo při procesu míchání. Konzistoměr zaznamenává jednotlivé odpory, které způsobuje materiál při míchání. Pokud je míchačka prázdná je nakalibrován na nulovou hodnotu, v této chvíli působí pouze odpor vzduchu, který je v porovnání s odporem materiálů zanedbatelný.

V každém autodomíchači bylo 8 m³ čerstvého betonu a proces míchání byl rozdělen do 4 záměsí po 2 m³.

Tabulka 15: Odpor konzistoměru

Varianta	Přísada	Záměs	Odpor konzistoměru
1.	X	I	48
		II	50
		III	50
		IV	65
	Y	I	55
		II	62
		III	63
		IV	56
2.	X	I	53
		II	61
		III	62
		IV	82
	Y	I	60
		II	54
		III	52
		IV	80
3.	X	I	59
		II	54
		III	57
		IV	54
	Y	I	53
		II	53
		III	63
		IV	65

V tabulce č. 15 můžeme vidět průměrné hodnoty odporu konzistoměru pro záměsí v průběhu jednotlivých variant. Největší výkyv v zaznamenaných hodnotách můžeme pozorovat u IV. záměsí ve 2. variantě, kde bylo při míchání méně plastifikátoru, což je pravděpodobně důvodem většího odporu, protože čím je beton hutnější, tím je odpor vyšší.

3.6.7 Vodní součinitel

Vodní součinitel byl spočítán podílem obsahu účinné vody a obsahu cementu.

Účinná voda byla spočtena:

$$v = \text{voda čistá} - \text{voda na váze} + \text{voda přidána} \left[\frac{\text{kg}}{8 \text{ m}^3} \right]$$

Vzorec 3: Výpočet účinné vody

Kde:

voda čistá = vstupní množství čisté vody při míchání

voda na váze = množství vody, které zůstalo na vahách po předchozím míchání

voda přidaná = množství vody, které bylo dodatečně přidáno v průběhu míchání

Tabulka 16: - Vodní součinitele zkoušených variant

Varianta	Přísada	Př. voda [kg/m ³]	Voda na v. [kg/m ³]	Voda čistá [kg/m ³]	v [kg/m ³]	c [kg/m ³]	popílek [kg/m ³]	w [%]
1.	X	0	20	1344	1324	2718	201	0,47
	Y	19	0	1360	1379	2718	201	0,49
2.	X	0	20	1364	1344	2722	200	0,48
	Y	0	20	1346	1326	2720	200	0,47
3.	X	0	15	1352	1337	2722	200	0,48
	Y	0	15	1351	1336	2722	200	0,48

*pozn: Voda obsažená v plastifikátoru byla zanedbána.

Jak můžeme vidět v tabulce č. 16 vodní součinitel zůstává téměř u všech betonových směsí. Vodu obsaženou v kamenivu zanedbáváme, ale byla zaznamenána vlhkost kameniva, která byla 4,2 % ve všech případech.

4. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo přiblížit plastifikační přísady a možnosti jejich použití v praxi. V teoretické části jsme se seznámili s různými druhy plastifikačních přísad se zaměřením na superplastifikační přísady na bázi polykarboxylátu, které jsou v současnosti nejvyužívanějším typem plastifikátorů při výrobě betonu.

V praktické části jsme zkoumali vlivy superplastifikačních přísad na vlastnosti betonu. Porovnávali jsme mezi sebou 2 různé plastifikační přísady X a Y, které byly přidávány ve 3 různých variantách. V 1. variantě jsme zvolili běžný postup, kde se veškeré množství superplastifikační přísady přidalo neprodleně po smíchání vody s cementem. Ve 2. variantě jsme ubrali část přísady a ubrané množství dodatečně domíchali na stavbě. Ve 3. variantě jsme opět přidávali veškeré množství superplastifikátoru, ale tentokrát ještě před smícháním cementu s vodou. Pro tento účel byla vybrána jedna referenční receptura, kde se měnil pouze druh a způsob přidávání superplastifikační přísady. Celé měření se provádělo, jak na betonárce, tak na stavbě během jednoho dne, abychom eliminovali vnější vlivy, které mohou mít na vlastnosti čerstvého betonu vliv, jako například rozdílná teplota nebo vlhkost kameniva. U porovnávání superplastifikátorů jsme se zaměřili zejména na jejich vliv na konzistenci neboli zpracovatelnost čerstvého betonu a tlakovou pevnost ztvrdlého betonu.

4.1 Účinnost plastifikátorů na konzistenci čerstvého betonu

Pro měření konzistence čerstvého betonu byla zvolena zkouška sednutí Abramsova kužele, které byla prováděna ve 4 různých intervalech. Ihned po namíchání betonové směsi, po příjezdu autodomíchávače na stavbu a poté 90 a 150 minut od namíchání.

Přísada X se ukázala jako efektivnější ve variantách 1 a 3, tedy v případě, že je veškeré množství superplastifikátoru přidáno již v procesu míchání. Naopak přísada Y byla účinnější při dodatečném přidání na stavbě. S výjimkou přísady Y v 1. fázi byl ve všech případech zachován stupeň konzistence S3 i po 150 minutách.

4.2 Vliv plastifikátorů na tlakovou pevnost betonu

Tlaková pevnost betonu byla měřena ve 2, 7 a 28 dnech. Z každé receptury bylo odebráno celkem 10 krychlí, vždy 5 na betonárce a 5 na stavbě. Krychle stlačované po 28 dnech byly 3 a výsledky byly zprůměrovány, krychle stlačované po 2 a 7 dnech byly vždy po jedné. Z organizačních důvodů byly krychle stlačované na betonárce a na stavbě odvezeny do rozdílných laboratoří, což se ukázalo jako chyba kvůli rozdílným hodnotám při jejich stlačování.

Z naměřených hodnot můžeme celkem jasně vyvodit, že druh i varianta přidávání plastifikační přísady má zanedbatelný vliv na tlakovou pevnost betonu. Nejzajímavějším jevem v tomto případě byla rozdílnost výsledků z 2 různých laboratoří, kterou mohl pravděpodobně způsobit rozdílný typ stlačovacího lisu, anebo způsob ukládání před stlačením.

Pro volbu superplastifikační přísady by tedy bylo vhodnější přihlídnout k jejímu vlivu na konzistenci čerstvého betonu.

4.3 Vliv dávkování plastifikátoru do čerstvého betonu

Jak již bylo zmíněno v předchozím bodě, z výsledků vyplývá, že způsob dávkování plastifikátoru nikterak významně neovlivňuje tlakové pevnosti. Naopak u konzistence čerstvého betonu se vliv dávkování prokázal jako jeden ze zásadních faktorů.

Dodatečné dávkování plastifikační přísady do autodomíchávače na stavbě se prokázalo jako velmi efektivní pro okamžité zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Zpracovatelnost sice v čase opět klesá, ale i po 150 minutách je stále v mezích stupně S3. Pokud by se nejednalo o hustě vyztužené nebo atypicky tvarované konstrukce, neměl by být s ukládkou čerstvého betonu žádný problém.

Pokud bychom nechtěli dodávat plastifikátor na stavbě, což je pochopitelně častým případem, obzvláště pokud je beton ukládám pomocí čerpadla a každé zdržení betonáže je nežádoucím, jeví se varianta 3. jako nejefektivnější. V této variantě se jednotlivé složky smíchávaly v pořadí kamenivo + voda + přísady a příměsí + cement, naopak ve variantě 1. šlo o standardní pořadí kamenivo + voda + cement a až poté přísady a příměsí. Při přidání přísad a příměsí před smícháním cementu s vodou jsme pozorovali nejenom výrazně lepší zpracovatelnost, ale také docházelo k jejímu zachování i po 150 minutách.

Důvodů, proč k tomuto jevu dochází, může být hned několik a těžko říct, zda by tento způsob byl stejně efektivní i pro jiné receptury s jiným zastoupením jednotlivých složek. V tomto případě je tento způsob míchání výrazně efektivnější než dodávat plastifikátor na stavbě, ale pro vyvození závěru, že se

jedná o pravidlo, by byla potřeba provést rozsáhlejší a podrobnější měření. Dalším problémem je, že přesné chemické složení superplastifikačních přísad je výrobním tajemstvím dodavatelů. Bez znalosti zastoupení a typu jednotlivých chemických složek se nedá přesně definovat, které látky mohou plastifikátor aktivovat.

4.4 Porovnání výsledků s technickými listy výrobců

V tabulce č. 3 můžeme vidět výtah specifikací superplastifikátorů X a Y garantovaných jejich výrobci. Jejich vlastnosti jsou až na vzhled, obsah sušiny, pH a maximální obsah alkálií totožné. Můžeme vidět hypotézu, jak ovlivňují vlastnosti betonu při zachování konzistence betonu, nebo při stejném vodním součiniteli. V našem měření jsme porovnávali směsi, kde byl zachován vodní součinitel, ale protože výrobce porovnává vliv superplastifikátoru s referenční recepturou bez superplastifikační přísady, nešlo tyto hypotézy ověřit ani vyloučit. V praxi se totiž superplastifikátor přidává téměř do všech běžně používaných receptur. Výrobci deklarují stejný vliv obou superplastifikátorů na jednotlivé vlastnosti betonu, což naše měření v případě tlakové pevnosti a obsahu vzduchu potvrdilo. Rozdílný vliv měly přísady pouze na konzistenci, ale to nijak nevyklučuje, že splňují specifikace uvedené výrobci.

5. Seznam zdrojů

- [1] MARIO COLLEPARDI: Moderní beton, Praha, 2009, ISBN 978-80-87093-75-7
- [2] JAN VETCHÝ: Přísady do betonů a malt I, 2015, Dostupné z [WWW]: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-i/>
- [3] JOSEF FLÁDR: Technologie betonu, přednášky, Složky betonu a technologie výroby, Dostupné z [WWW]: http://people.fsv.cvut.cz/www/fladrijos/vyuka/YTB/YTB_cviceni.html
- [4] MILENA PAVLÍKOVÁ, ZBYŠEK PAVLÍK, JIŘÍ HOŠEK: Materiálové inženýrství 1 druhé rozšířené vydání. Praha, 2011
- [5] PIERRE-CLAUDE AITCIN: Vysokohodnotný beton, Praha, 2005, ISBN 80-86769-39-9
- [6] ČSN EN 12350-2, Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [7] ČSN EN 12350-7, Zkoušení čerstvého betonu: Část 7: Obsah vzduchu: Tlakové metody. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [8] ČSN EN 12350-6, Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [9] ČSN EN 12390-3, Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [10] PETR PYTLÍK, Technologie betonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2000. IBSN 80-214-1647-5
- [11] EBETON, slovník pojmů [online]. Svaz výrobců betonu ČR, Dostupné z [WWW]: <http://www.ebeton.cz/pojmy>
- [12] ČSN EN 206, Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ICS 91.100.30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014
- [13] ČSN EN 12350-1: Zkoušení čerstvého betonu: Část 1: Odběr vzorků. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [14] ČSN EN 12390-2: Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [15] Příručka technologa: BETON. 1. vydání. Českomoravský beton, a.s., 2013.
- [16] ČSN EN 934-2 (722326) Přísady do betonu, malty a injektážní malty: Část 2: Přísady do betonu: Definice a požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [17] Pevnost v tlaku. In: Ebeton [online]. Svaz výrobců betonu, CZ SVB. [vid. 24. 4. 2017], Dostupné z [WWW]: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>

6. Seznam tabulek

Tabulka 1: Vliv přísad snižujících spotřebu vody na vlastnosti betonu., zdroj: [1]

Tabulka 2: Rozdělení podle konzistence, zdroj: [6]

Tabulka 3: Specifikace superplastifikačních přísad

Tabulka 4: Receptura pro 1. variantu

Tabulka 5: Receptura pro 2. variantu

Tabulka 8: Receptura pro 3. variantu

Tabulka 7: Harmonogram měření

Tabulka 9: Naměřené hodnoty sednutí

Tabulka 910: Tlakové pevnosti

Tabulka 10: Obsah vzduchu v čerstvém betonu

Tabulka 11: Objemová hmotnost čerstvého betonu

Tabulka 12: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Tabulka 13: Teploty vnějšího vzduchu

Tabulka 14: Teploty čerstvého betonu

Tabulka 15: Odpor konzistoměru

Tabulka 16: - Vodní součinitele zkoušených variant

7. Seznam obrázků

- Obrázek 1: Melaminové plastifikátory, zdroj: [2]
- Obrázek 2: Naftalenové plastifikátory, zdroj: [2]
- Obrázek 3: Lignosulfonátové plastifikátory, zdroj: [2]
- Obrázek 4: Princip působení plastifikátoru na bázi polykarboxylátu., zdroj: [1]
- Obrázek 5: Chemická struktura polykarboxylátů, zdroj: [1]
- Obrázek 6: Diagram vlivu plastifikátoru na vlastnosti betonu., zdroj: [1]
- Obrázek 7: Použití plastifikátoru na zvýšení pevnosti., zdroj: [1]
- Obrázek 8: Použití superplastifikátoru na snížení obsahu cementu., zdroj: [1]
- Obrázek 9: Použití superplastifikátoru na zlepšení zpracovatelnosti., zdroj: [1]
- Obrázek 10: Produkty hydratace, zdroj [5]
- Obrázek 11: Rychlost uvolňování tepla v průběhu hydratace., zdroj [5]
- Obrázek 12: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 1 hodina., zdroj: [5]
- Obrázek 13: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 2 hodiny., zdroj: [5]
- Obrázek 14: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 4 hodiny., zdroj: [5]
- Obrázek 15: Mikrostruktura cementové pasty ve stáří 9 hodin, zdroj: [5]
- Obrázek 16: Zkouška sednutí Abramsova kužele, zdroj: [6]
- Obrázek 17: Schéma nádoby na měření obsahu vzduchu tlakovou metodou., zdroj: [7]
- Obrázek 18: Zkouška pevnosti v tlaku, zdroj [17]
- Obrázek 19: Připravené dodatečné dávky superplastifikátoru.
- Obrázek 5: Zkouška sednutí
- Obrázek 26: Výsledky měření obsahu vzduchu
- Obrázek 22: Měření objemové hmotnosti
- Obrázek 23: Autodomíchávač na stavbě s čerpadlem v pozadí.
- Obrázek 24: Stanoviště měření přímo na stavbě.
- Obrázek 25: Zkouška sednutí Abramsova kužele po 150 minutách.

Obrázek 26: Nádoba tlakového přístroje na zkoušku obsahu vzduchu.

Obrázek 27: Odečtení sednutí kužele

Obrázek 28: Krychle skladované na stavbě v průběhu měření.

8. Seznam vzorců

Vzorec 1: Výpočet vodního součinitele, zdroj [3]

Vzorec 2: Výpočet objemové hmotnosti, zdroj [8]

Vzorec 3: Výpočet účinné vody

9. Seznam grafů:

Graf 1: Složení betonu, zdroj: [4]

Graf 3: Graf křivky zrnitosti

Graf 3: Průběh konzistence v závislosti na čase u 1. varianty

Graf 4: Průběh konzistence v závislosti na čase u 2. varianty

Graf 5: Průběh konzistence v závislosti na čase u 3. varianty

Graf 6: Průběh pevností na betonárce

Graf 7: Průběh pevností na betonárce

Graf 8: Průběh pevností na betonárce u 1. varianty

Graf 9: Průběh pevností na stavbě u 1. varianty

Graf 10: Průběh pevností na betonárce u 2. varianty

Graf 11: Průběh pevností na stavbě u 2. varianty

Graf 12: Průběh pevností na betonárce u 3. varianty

Graf 13: Průběh pevností na stavbě u 3. varianty