

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**ANALÝZA VLIVU VYBRANÝCH PŘÍRAD NA
VLASTNOSTI ČERSTVÉHO BETONU**

IMPACT OF SELECTED ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF FRESH
CONCRETE

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Hana Hanzlová, CSc.

Bc. Martin Kryštof

2017

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně za odborného vedení Ing. Hany Hanzlové, CSc. a Ing. Josefa Fládra, Ph.D., za použití literatury a programů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze 8. 1. 2017

.....

Bc. Martin KRYŠTOV

Rád bych poděkoval vedoucím mé práce Ing. Haně Hanzlové, CSc. a Ing. Josefu Fládřovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. KRYŠTOV Jméno: Martin Osobní číslo: 396511
Zadávající katedra: betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza vlivu vybraných přísad na vlastnosti čerstvého betonu
Název diplomové práce anglicky: Impact of selected additives on the properties of fresh concrete
Pokyny pro vypracování:
Rešerše část - druhy přísad, dávkování, vliv na vlastnosti čerstvého betonu.
Vliv plastifikačních přísad na dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu.
Vliv zpomalovačů na rychlost nárůstu tlakové pevnosti.
Doprovodné zkoušky ztvrdlého betonu.
Vyhodnocení experimentů.

Seznam doporučené literatury:
P. Pytlík Technologie betonu
Colleopadi Moderní beton
dostupné podklady od výrobců přísad
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Hana Hanzlová, CSc.
Datum zadání diplomové práce: 6.10.2016 Termin odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je stručný přehled druhů přísad do betonu a analýza vlivu vybraných přísad na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Cílem práce je vyhodnotit jednotlivé vlivy přísad, jako je doba zpracovatelnosti čerstvého betonu a rychlost nárůstu tlakové pevnosti betonu. Za tímto účelem byly provedeny doprovodné zkoušky ztvrdlého betonu.

Klíčová slova

- Přísady do betonu
- Čerstvý beton
- Zpracovatelnost
- Tlaková pevnost
- Zkoušky betonu

Abstract

The theme of this thesis is a overview of the types of additives and analysis of the influence of selected additives on the properties of fresh and hardened concrete. The object of this work is to evaluate the influences of various additives, such as fresh concrete workability time and the rate of increase in compressive strength. For this purpose were made accompanying tests of hardened concrete.

Keywords

- Additives for concrete
- Fresh concrete
- Workability
- Compressive strength
- Concrete testing

Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD | 7 |
| TEORETICKÁ ČÁST | 8 |
| 1. Složení betonu | 8 |
| 1.1. Přísady | 9 |
| 1.1.1. Urychlující přísady | 10 |
| 1.1.2. Zpomalující přísady | 13 |
| 1.1.3. Plastifikátory | 15 |
| 1.1.4. Superplastifikátory | 18 |
| 1.1.5. Provzdušňující přísady | 21 |
| 1.1.6. Stabilizační přísady | 23 |
| 1.1.7. Hydrofobizační a těsnící přísady | 24 |
| 1.1.8. Ostatní přísady | 26 |
| 1.2. Příměsi | 29 |
| 1.2.1. Příměsi téměř inertní | 29 |
| 1.2.2. Pucolány nebo latentně hydraulické příměsi | 30 |
| EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 32 |
| 1. Postup návrhu a zkoušení | 32 |
| 2. Požadované vlastnosti betonu | 33 |
| 3. Zkoušení betonu | 36 |
| 4. Specifikace materiálu | 45 |
| 5. Postup návrhu receptury | 52 |
| 6. Zhodnocení výsledků | 90 |
| 7. Závěr | 93 |
| Literatura | 95 |
| Normy | 95 |
| Stránky výrobců přísad | 96 |
| Seznam obrázků | 96 |
| Obrázky neoznačené zdrojem vlastní prací autora | 97 |
| Seznam tabulek | 97 |
| Tabulky neoznačené zdrojem jsou vlastní prací autora | 98 |
| Použité programy | 98 |

ÚVOD

Tato diplomová práce obsahuje jak teoretickou, tak praktickou část. Teoretická část je zaměřena na obecné složení betonu s přidáním chemických přísad. Jsou zde popsány jednotlivé druhy přísad, jejich vliv na čerstvý nebo ztvrdlý beton, normové požadavky a používané chemické látky. Experimentální část je zaměřena na analýzu vlivu vybraných přísad na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu.

Cílem práce bylo vyhodnotit vliv jednotlivých přísad na vlastnosti betonu, jako je doba zpracovatelnosti čerstvého betonu a rychlost nárůstu tlakové pevnosti ztvrdlého betonu. Součástí práce byly doprovodné zkoušky ztvrdlého betonu.

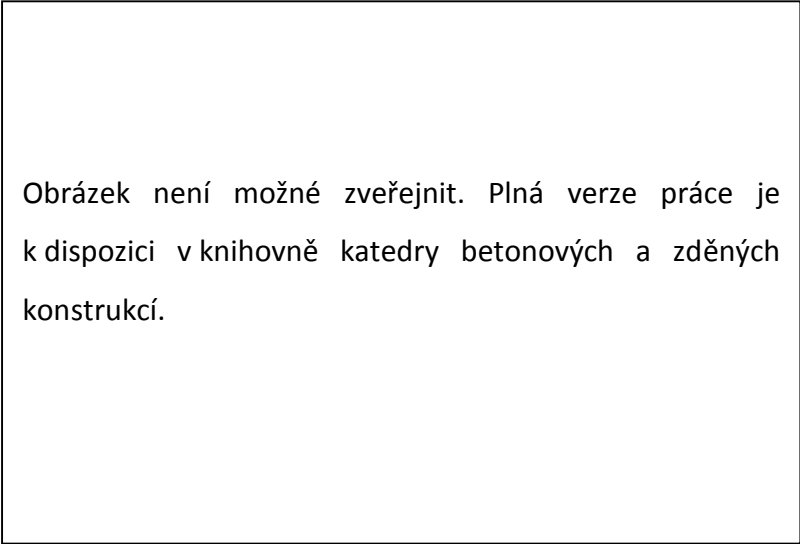
Téma diplomové práce bylo založeno na výzkumném projektu, který má navrhnout recepturu betonu pro stavební firmu zabývající se realizací betonových jímek a podobných konstrukcí. Receptura betonu byla navrhována s ohledem na stupně vlivu prostředí, které byly specifikovány firmou a na další konkrétní požadavky.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Složení betonu

Beton tvoří dvě hlavní složky a to kamenivo a cementový tmel. Hlavní funkcí kameniva je vytvoření pevné kostry betonu s minimální mezerovitostí. Kamenivo se v dnešní době skládá obvykle ze tří frakcí, kterými jsou písek, jemný a hrubý štěrk. Cementový tmel obaluje a spojuje jednotlivá zrna kameniva a je tvořen cementem a vodou. V dnešní době, kdy jsou vysoké a často i protichůdné požadavky na beton, jsou nedílnou součástí moderního betonu vedle vody, cementu a kameniva chemické přísady a minerální příměsi. Přidáním těchto doplňkových složek získáváme beton lepších vlastností a v porovnání s obyčejným betonem dostáváme beton speciální. Použití přísad a příměsí je specifikováno v normě *ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [n2]*.

[1][2]



Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 1 - Hmotnostní podíl složek betonu [8]

1.1. Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají do čerstvého betonu před nebo při míchání za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Nejpoužívanější formou přísad bývají látky kapalné, ale v některých případech se mohou vyskytovat i jako práškové. Jejich přidávané množství se pohybuje v relativně malých dávkách a to v jednotkách procent hmotnosti cementu, což závisí na individuálních požadavcích pro danou směs. Maximální doporučená dávka se uvádí dle ČSN EN 206 [n2] 5 % hmotnosti cementu. Při vyšším množství je nutné prokázat, že nedochází ke zhoršení vlastností a trvanlivosti betonu. Při dávce menší než 0,2 % hmotnosti cementu je potřeba rozptýlit přísadu v části záměsové vody. Pokud je množství použité přísady vyšší než 3 l/m³ betonu, musí se vzít v úvahu při stanovení vodního součinitele. V případě použití více přísad je nutné prokázat vzájemnou snášenlivost průkaznými zkouškami. Přísady do betonu jsou jmenovitě specifikovány s požadavky v evropské normě ČSN EN 934-2 - *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Definice, požadavky, shoda, značení a označování štítky* [n1].

Působení přísad je především směřováno na cementovou suspenzi, tudíž důležitou roli hraje druh cementu. Přísady působí zejména na průběh hydratace cementu, kde se jedná o chemické reakce se slínkovými minerály nebo povrchem tuhých částic cementu. Pro cementy s vyšším měrným povrchem, tedy při vyšší jemnosti mletí cementu, vzniká větší reakční plocha, což usnadňuje průběh chemické případně fyzikálně-chemické reakce. Na druhou stranu může vyšší jemnost mletí způsobit snadnější shlukování zrn cementu. Také původ, tedy mineralogické složení cementu má vliv na účinnost přísad a samozřejmě v neposlední řadě koncentrace přísady, vztažená na hmotnost cementu, ovlivňuje chování a reakci se zrny cementu.

Přísady se dělí podle hlavního účelu na následující typy (ČSN EN 934-2 [n1]):

- Urychlující přísady
- Zpomalující přísady
- Plastifikátory, přísady snižující obsah vody

- Superplastifikátory, přísady silně snižující obsah vody
- Provzdušňující přísady
- Stabilizační přísady
- Hydrofobizační a těsnící přísady
- Ostatní přísady, které nejsou specifikovány v normě:
 - Inhibitory koroze, inhibitory alkalicko-křemičité reakce
 - Přísady redukující smršťování betonu
 - Probarvující přísady
 - Biocidní přísady
 - Plynotvorné přísady
 - Pěnotvorné přísady
 - Odpěňovací přísady
 - Adhezní přísady
 - Probarvující přísady

[1][2][3][4][5][6][n1]

1.1.1. Urychlující přísady

Hlavní funkcí těchto přísad je urychlení hydratace cementu. Musí se věnovat pozornost dávce přísady, poněvadž při nízkých dávkách mohou působit jako akcelerátor, ale při vyšších jako retardér. Rozdělují se na dva typy podle doby použití, tedy zda působí na čerstvý nebo již tvrdnoucí beton. Urychlovače musí splňovat určité požadavky, které budou uvedeny u jednotlivých typů a hodnotí se při stejné konzistenci směsí.

1.1.1.1. Urychlovače tuhnutí

Působí na čerstvý beton v průběhu prvních minut hydratace cementu. Začátek tuhnutí obvykle posunují o 1 až 3 hodiny a zkracují dobu tuhnutí, tedy přechod čerstvého betonu z plastického do tuhého stavu, obvykle o 1 hodinu. Hlavní využití je pro stříkané betony při betonáži v tunelech, tzv. shotcrete, kde je požadováno zvýšení adheze stříkaného čerstvého betonu k podkladu.

Používají se dva typy urychlovačů tuhnutí a to na bázi křemičitanu sodného a vodné emulze síranu hlinitého neobsahující alkálie. První jmenované výrazně zkracují dobu tuhnutí přibližně už na 10 minut, což má ale vliv na dlouhodobou pevnost. Druhé jmenované nemají takovou účinnost při snížení doby tuhnutí, ale na druhou stranu nemají vliv na dlouhodobou pevnost betonu. Jejich výhodou je také zdravotní nezávadnost, což se o prvním typu říci nedá.

[1][2][6]

Pro tento typ urychlovače se hlídá pokles pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, která by neměla klesnout pod 80 % pevnosti referenčního vzorku betonu při stejné konzistenci a po 90 dnech by měl mít beton už minimálně stejnou pevnost jako referenční vzorek po 28 dnech. Dále počátek doby tuhnutí by měl nastat při 20 °C až po 30 minutách a při 5 °C by měl nastat dříve než 60 % času, kdy nastane počátek doby tuhnutí u kontrolní směsi. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší.

[n1]

1.1.1.2. Urychlovače tvrdnutí

Působí na tvrdnoucí beton v průběhu prvních dní a urychlují vývoj počáteční pevnosti betonu a mohou, ale nemusí mít vliv na tuhnutí betonu. Proto jsou používány v případě potřeby zvýšení jedno až tří denních pevností, což je například při prodloužení doby potřebné k odbednění v zimním období, kdy nižší teploty způsobují snížení počátečních pevností.

Dříve se jako urychlující přísady běžně používaly soli na bázi chloridů, které výrazně zvyšují stupeň hydratace a mají tak vliv na počáteční pevnosti cementové matrice. Problémem u těchto solí je, že jejich ionty napomáhají korozi kovové výztuže v betonu. Z tohoto důvodu se pro vyztužené betony doporučuje používat látky bez obsahu chloridů, mezi které patří například látky na bázi dusitanu a dusičnanu vápenatého, sodného nebo tri-etanolaminu. Urychlovače tvrdnutí jsou v dnešní době na ústupu a jsou nahrazovány plastifikátory, které ovlivňují nejen počáteční pevnosti, ale i konečné pevnosti betonu snížením množství záměsové vody.

[1][2][6]

U tohoto druhu urychlovače se kontroluje pevnost betonu v tlaku, konkrétně musí při 20 °C po 24 hodinách splnit minimálně 120 % pevnosti referenčního vzorku betonu bez této přísady a alespoň 90 % pevnosti, kterou dosáhne referenční vzorek po 28 dnech. Dále musí při 5 °C po 48 hodinách dosáhnout alespoň na 130 % pevnosti referenčního vzorku. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší.

[n1]

Mezi urychlovače tvrdnutí se řadí i tzv. mrazuvzdorné přísady, které vedle urychlovače tvrdnutí obsahují chemické látky např. vysokomolekulární alkoholy, které snižují bod tuhnutí vody v betonu. Tímto je zabráněno zamrznutí vody v pórech cementové matrice.

[1][2]

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 2 - Vliv urychlovače tuhnutí (s) a tvrdnutí (h) ve srovnání s referenčním betonem bez přísad (c) na stupeň hydratace (a) a pevnost betonu v tlaku (f) [2]

Vybrané komerční urychlovače s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaženým na hmotnost cementu:

- STACHEMA [v1]
 - Betodur A: urychluje tvrdnutí a nezhoršuje zpracovatelnost (mírně snižuje dávku záměsové vody), dop. dávka 0,8 – 3,0 % dle řady výrobku, na bázi vodného roztoku dusičnanu sodného nebo vápenatého
 - Ekosal L: pro stříkané betony, okamžitě urychluje tuhnutí a tvrdnutí, dop. dávka 2,0 – 8,0 %, na bázi síranu hlinitého a aditiv
- BETOSAN [v2]
 - Frostop L: urychluje tvrdnutí a zlepšuje zpracovatelnost (snižuje dávku záměsové vody), dop. dávka 0,5 – 2,0 %, na bázi dusičnanu sodného
- SIKA [v3]
 - SikaRapid 1: urychluje tvrdnutí, dop. dávka 0,5 – 2,0 %, na bázi dusičnanu sodného
- MAPEI [v4]
 - Mapefast: urychluje tuhnutí a tvrdnutí, mrazuvzdorná přísada, dop. dávka 0,5 – 2,0 %, na bázi uhličitanu a hlinitanu sodného

1.1.2. Zpomalující přísady

Hlavní funkcí zpomalovačů je prodloužení doby tuhnutí čerstvého betonu, tedy přechodu z plastického stavu do stavu tuhé látky. Toho docílí tím, že zpomalují proces hydratace cementu a působí v prvních minutách až hodinách. Na povrchu hydratujících zrn cementu vznikají sloučeniny, které zpomalují difuzi molekul vody a tím hydrataci. Jejich využití je potřebné například při dopravě transportbetonu nebo při betonáži o velkém objemu, kde je potřeba omezit pracovní spáry. Dále pak v teplém počasí, kdy vysoké teploty urychlují počáteční hydrataci cementu, což může

vést například k rozvoji trhlinek a snížení pevnosti betonu. Obvykle bývá pevnost v tlaku po 28 dnech vyšší, ale záleží na koncentraci přísady. Při vyšších dávkách u některých retardérů může dojít k úplnému zastavení hydratace cementu.

Používané látky pro zpomalení tuhnutí jsou obecně anorganické látky na bázi solí mědi a zinku nebo organické látky jako například karboxylové kyseliny, lignosulfonáty nebo cukry, které jsou zvláště účinné a stačí malá dávka, přibližně 0,1 % hmotnosti cementu.

[1][2][6]

Stejně jako tomu bylo u urychlovačů tvrdnutí, tak i u zpomalovačů se kontrolují ty stejné vlastnosti při stejné konzistenci směsí. Po 7 dnech by měla být pevnost v tlaku alespoň 80 % a po 28 dnech alespoň 90 % pevnosti v tlaku referenčního vzorku. Počátek doby tuhnutí by měl být o 90 minut delší a konec tuhnutí o 360 minut delší než u referenčního vzorku čerstvého betonu. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší.

[n1]

Extrémním využitím, uváděným v zahraniční literatuře, těchto přísad jsou tzv. superzpomalovače, které jsou vyvíjeny pro opětovné použití nespotřebovaného betonu. Z důvodu velkého množství odpadního nespotřebovaného čerstvého betonu jsou zaváděny opatření ze strany ochránců přírody. Jedná se o alternativu cenově příznivější než nakládání s odpadním betonem a skládají se ze dvou odděleně přidávajících se složek, první je stabilizátor a druhou pak aktivátor. Stabilizátor je velmi silný zpomalovač, který je založený např. na kyselině karboxylové a jeho dávka se pohybuje v širokém rozmezí až do 8 % hmotnosti cementu a je tak dosaženo stabilizace nespotřebované čerstvé betonové směsi v plastickém stavu až na několik dní. Aktivátor je bezchloridový urychlovač, který se následně přidá v závislosti na použitém množství stabilizátoru až do 1 % hmotnosti cementu.

[2]

Vybrané komerční zpomalovače s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaženým na hmotnost cementu:

- STACHEMA [v1]
Retardal: zpomaluje proces hydratace cementu a prodlužuje tak dobu zpracovatelnosti, nemá další účinky, dop. dávka 0,1 - 0,6 % dle řady výrobku, na bázi vodného roztoku lignosulfonátů

- SIKA [v3]
Sika VZ 10: zpomaluje proces hydratace cementu a prodlužuje tak dobu zpracovatelnosti, dop. dávka 0,1 – 2,5 %, na bázi fosfátů

- MAPEI [v4]
Mapetard: zpomaluje proces hydratace cementu a prodlužuje tak dobu zpracovatelnosti, mírný ztekucující účinek, dop. dávka 0,2 – 0,5 %, na bázi vodního roztoku polymerů

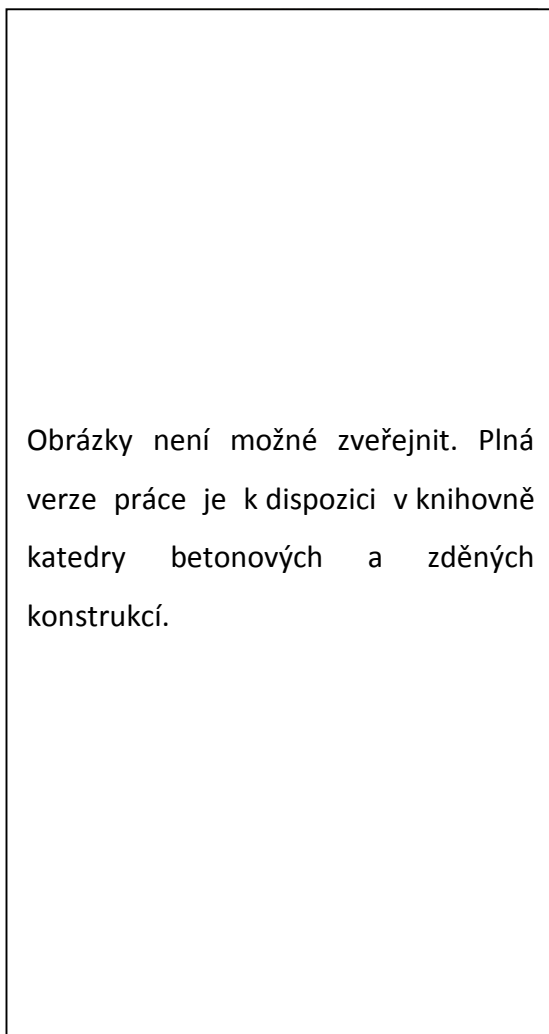
1.1.3. Plastifikátory

Plastifikační přísady jsou nejdéle a nejčastěji používané přísady, které na jedné straně umožňují snížit množství záměsové vody a na straně druhé zlepšit zpracovatelnost. Tímto způsobem můžeme docílit betonu s lepšími vlastnostmi. Používají se hlavně pro transportbeton, dále pro usnadnění zpracování nebo pro dosažení lepší kvality povrchu betonu. Plastifikační přísady lze použít následujícími způsoby:

1. Snížení množství záměsové vody
 - zachování zpracovatelnosti čerstvého betonu, zvýšení pevnosti a trvanlivosti ztvrdlého betonu
2. Zachování množství záměsové vody
 - zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu
3. Snížení množství cementu a vody, zachování w/c
 - úspora materiálu a zároveň zachování pevnosti a zpracovatelnosti, navíc snížení vývinu hydratačního tepla, smrštění a dotvarování

Plastifikátory snižující obsah záměsové vody se dělí navíc podle účinků na tři druhy:

- N ... přísada bez vlivu na průběh tuhnutí
- R ... zpomalující přísada
- A ... urychlující přísada



Obr. 3 - Vliv jednotlivých druhů plastifikátorů na pevnost v tlaku pro beton se stejným vodním součinitelem [2]

Obr. 4 - Vliv jednotlivých druhů plastifikátorů na pevnost v tlaku pro beton se stejnou zpracovatelností [2]

Z grafu na *Obr. 3* je patrné, že vývoj pevnosti betonu v tlaku při zachování stejného vodního součinitele je víceméně podobný až na prvních pár dní u zpomalujícího plastifikátoru. Přísady tedy plní spíše funkci zlepšující zpracovatelnost. Jak je vidět z grafu na *Obr. 4*, tak snížení množství záměsové vody má vliv na krátkodobou i dlouhodobou pevnost betonu v tlaku.

Tyto přísady mají dvě složky. První složku, která snižuje spotřebu záměsové vody a zpomaluje tuhnutí, mají shodnou se zpomalujícími přísadami a používají se např. látky na bázi lignosulfonátů (kap. 1.1.2.). Druhou složku, která potlačuje zpomalující účinek, mají shodnou s urychlovači (kap. 1.1.1.). Nevýhodou obyčejných plastifikačních přísad je, že dochází ke zhoršování zpracovatelnosti od chvíle jejich přidání. Plastifikační efekt je docílen povrchovou aktivitou plastifikátorů, které se ve vodném roztoku adsorbují na tuhé částice cementu. Plastifikátory jsou ve většině případů složeny z molekul s poměrně dlouhými řetězci zakončenými silně polární skupinou, které převládají na vnějším povrchu upravených zrn cementu. To způsobuje spolu s okolními molekulami vody vznik elektrické dvojvrstvy a díky tomu dochází k vzájemnému odpuzování jednotlivých zrn cementu. Elektrické odpuzování spolu s mechanickým efektem vodního obalu snižuje tření mezi jednotlivými zrny a tím je dosaženo vyšší pohyblivosti směsi. Doporučené dávkování se pohybuje do 3 % hmotnosti cementu dle individuálních požadavků a záleží také například na druhu přísady a dále také na druhu a množství použitého cementu.

[1][2][4][5][6]

Stejně jako je tomu u ostatních přísad, tak i na plastifikační přísady jsou kladeny určité požadavky pro čerstvý beton při stejné konzistenci. Obsah záměsové vody je nutné snížit alespoň o 5 % a s tím související pevnost betonu v tlaku s touto přísadou má být po 7 dnech minimálně 110 % pevnosti stejně starého vzorku bez přísady a po 28 dnech také alespoň 110 % pevnosti stejně starého vzorku bez přísady. V dnešní době jsou nabízeny plastifikátory, které udávají snížení záměsové vody až o 10 %. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší.

[n1]

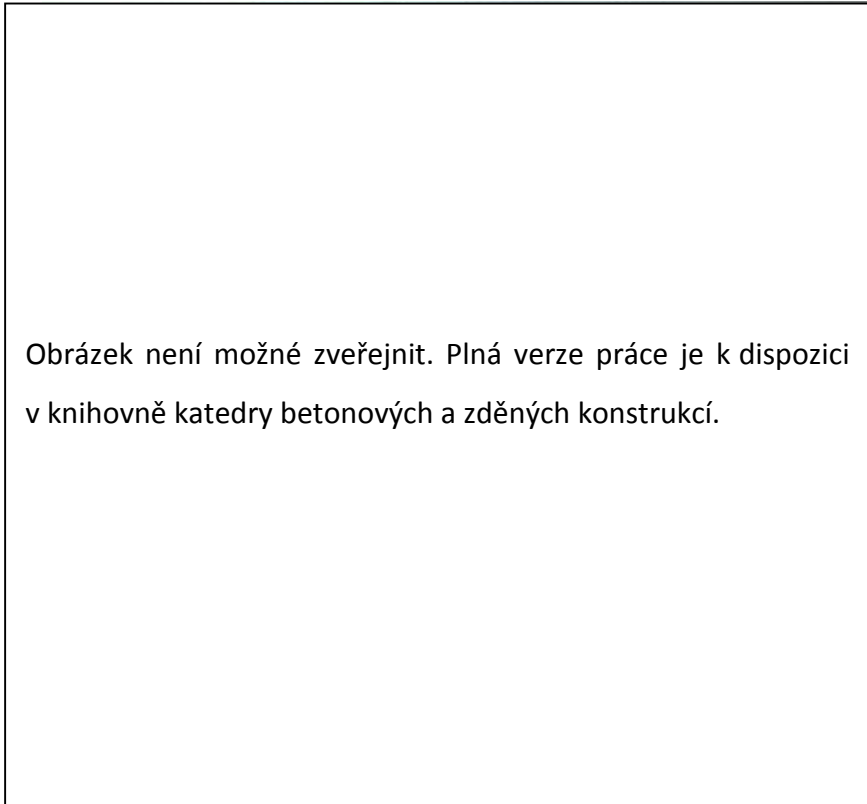
Vybrané komerční plastifikátory s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaheným na hmotnost cementu:

- STACHEMA [v1]
Stacheplast: plastifikační přísada na bázi lignosulfonátů nebo polykarboxyetherů s dop. dávkou 0,6 – 1,5 % dle řady výrobku, redukce záměsové vody o 5 – 10 %

- SIKA [v3]
Plastiment: plastifikační přísada na bázi modifikovaného lignosulfonátu, dop. dávka 0,2 – 0,9 %, redukce záměsové vody o 5 – 10 %
- MAPEI [v4]
Mapeplast N: plastifikační přísada na bázi aktivních polymerů, dop. dávka 0,2 – 0,5 %, redukce záměsové vody o 5 – 10 %

1.1.4. Superplastifikátory

Superplastifikátory jsou přísady silně snižující potřebné množství záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti a mají stejné způsoby použití jako přísady plastifikační (Obr. 5). Použití a dávkování je tedy obdobné jako u výše popsaných plastifikačních přísad (kap. 1.1.3.). Rozdílem jsou například kompatibilita s cementem, delší doba zpracovatelnosti nebo omezení krvácení betonu, což je často u plastifikačních přísad problém.



Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 5 - Schéma vlivu superplastifikátorů na čerstvý a ztvrdlý beton [2]

Rozdíl v účinnosti superplastifikačních a plastifikačních přísad je v odlišném chemickém působení. Plastifikátory se váží elektrostatickými silami na tuhé částice, tedy zrna cementu, a vytváří na nich jednotný záporný náboj. Tento jev způsobuje vzájemné elektrostatické odpuzování jednotlivých zrn cementu a tím jednodušší průběh hydratace. Díky tomu je potřeba k hydrataci cementu menší množství záměsové vody. Na rozdíl od toho u superplastifikátorů moderní generace na bázi polykarboxylátů, je za silným účinkem přísady spíše samotná adsorpce na cementová zrna než elektrostatické odpuzování zrn. Tyto látky se váží na zrna cementu jedním koncem svého řetězce a druhý konec molekuly superplastifikátoru zůstává volný a rotuje okolo zrna cementu, což způsobuje stérické odpuzování, které má delší dosah než elektrostatické odpuzování a trvá tak déle než hydratační produkty eliminují plastifikační účinek. Tím je zaručena delší doba zpracovatelnosti.

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 6 - Schématické znázornění rozdílného působení plastifikátoru vyvolávající elektrostatické odpuzování (vlevo) a superplastifikátoru způsobujícího stérické odpuzování (vpravo) [2]

Používají se přísady na bázi následujících organických látek:

- polykarboxyláty (superplastifikátory moderní generace)
- soli a deriváty ligninsulfonanů
- syntetické vodorozpustné kondenzáty polymerů
(sulfonované kondenzáty naftalenformaldehydové – SNF a melaminformaldehydové - SMF)

V dnešní době se používají superplastifikátory zejména na bázi polymerů polykarboxylátů, které potlačují ztrátu zpracovatelnosti a přispívají k vyššímu účinku ztekucení a stabilitě čerstvého betonu.

[1][2][3][4][6]

Na superplastifikátory jsou kladeny rozdílné požadavky pro směsi při stejné konzistenci a pro směsi při stejném vodním součiniteli. V prvním případě je nutné snížit obsah záměsové vody alespoň o 12 % a s tím související pevnost betonu v tlaku má být po 1 dnu minimálně 140 % pevnosti stejně starého vzorku bez přísady a po 28 dnech alespoň 115 % pevnosti stejně starého vzorku bez přísady. V druhém případě musí dojít ke zlepšení konzistence. Pro referenční beton po přidání přísady musí být sednutí směsi větší alespoň o 120 mm z původních 30 ± 10 mm a zvětšení rozlití alespoň o 160 mm z původních 350 ± 20 mm. Konzistence čerstvého betonu nesmí klesnout po 30 minutách od přidání přísady pod hodnotu původní konzistence kontrolní směsi bez přísady. Pevnost betonu v tlaku by měla být po 28 dnech alespoň 90 % pevnosti referenčního vzorku bez přísady. Zároveň musí být u obou případů obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší.

[n1]

Vybrané komerční superplastifikátory s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaheným na hmotnost cementu:

- STACHEMA [v1]

Stachement NN, ML, MM apod.:

superplastifikační přísada na bázi vodorozpustných kondenzátů polymerů (SNF a SMF) s dop. dávkou 0,5 – 2,0 % dle řady výrobku, redukce záměsové vody až o 30 %

Stachement 757, 2483, s33 apod.:

superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem s dop. dávkou 0,4 – 1,5 % dle řady výrobku, výrazně prodlužuje dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu až na 2 hodiny, redukce záměsové vody až o 30 %

- BETOSAN [v2]

Adiflow : superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem, dop. dávkou 0,4 – 2,5 %, redukce záměsové vody až o 30 %

- SIKA [v3]
ViscoCrete: superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem, dop. dávka 0,2 – 2,0 %
- MAPEI [v4]
Mapefluid N: superplastifikační přísada na bázi aktivních polymerů s vysokým plastifikačním účinkem, dop. dávka 0,5 – 1,5 %, redukce záměsové vody až o 30 %

1.1.5. Provzdušňující přísady

Hlavní funkcí provzdušňujících přísad je vytvoření uzavřených vzduchových pórů jemně rozmístěných v čerstvém betonu. Tyto póry slouží jako expansní prostor při zvětšujícím se objemu krystalů ledu nebo chemických solí (rozmrazovací soli nebo mořské vody) a snižují tak hydrostatický tlak v pórovité struktuře cementového kamene. Proto jsou betony s rozptýlenými vzduchovými póry odolnější vůči působení mrazu a agresivním mořským solím. Používají se zejména ve vodním, silničním a mostním stavitelství. Dalšími příznivými účinky jsou např. snížení segregace a odměšování vody v čerstvém betonu, snížení spotřeby záměsové vody a to až o 5 % nebo zlepšení plasticity.

Distribuce a velikost pórů závisí na následujících parametrech:

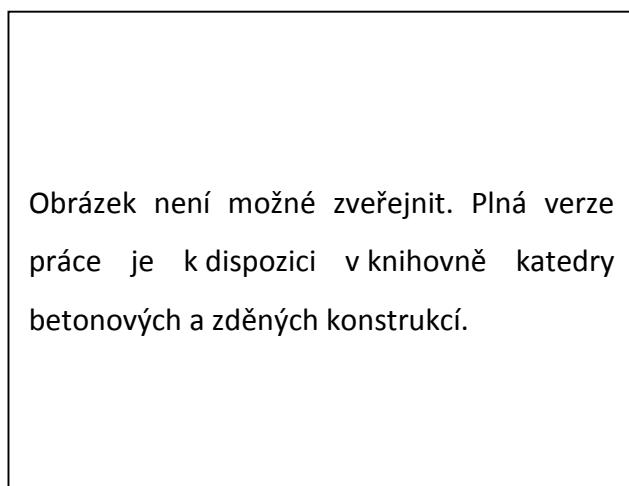
- druh a množství přísady, dávka přibližně 0,05 – 0,5 % hmotnosti cementu pro obsah vzduchu až 6 %
- množství, druh a jemnost mletí cementu (případně příměsí), čím jemnější mletí, tím větší množství provzdušňující přísady je potřeba
- granulometrie kameniva, se zvětšujícím se maximálním zrnem kameniva se snižuje potřebné množství pórů
- vodní součinitel w , s narůstajícím w zvětšování pórů
- intenzitě vibrace, dochází k vytěsňování pórů

V dnešní době se používají různé typy provzdušnění. Prvním typem jsou chemické látky např. produkty na bázi přirozených pryskyřic nebo soli mastných kyselin, které mění povrchové napětí vody. Dále je možné použít tzv. mikro dutinky, 0,02 až 0,08 mm duté tenkostěnné granulky, které vytvářejí dostatečně hustý systém mikropórů o zaručené velikosti. Jejich dávka se pohybuje mezi 1 a 3 kg/m³ betonu.

[1][2][5][6]

U těchto látek je důležité stanovení správné dávky pro dosažení potřebného obsahu vzduchu v betonu tak, aby byla zajištěna správná velikost pórů a jejich rozmístění v betonu. Účinnost přísady je tedy ovlivněna velikostí vzduchových pórů, která by měla být od 0,025 do 0,25 mm a jejich vzájemná vzdálenost, tedy součinitel prostorového rozložení pórů, by měla být menší než 0,2 mm. Větší vzduchové póry a větší vzdálenost jednotlivých pórů snižují trvanlivost. Obsah vzduchu v čerstvém betonu by měl být minimálně o 2,5 objemových % větší než u kontrolní směsi a celkový obsah by měl být od 4 do 6 objemových %. Každé procento provzdušnění snižuje objemovou hmotnost betonu. Negativní vliv má provzdušnění na pevnost betonu v tlaku (*Obr. 7*). S narůstajícím procentem provzdušnění klesá pevnost betonu v tlaku a to přibližně o 5 % na 1 % provzdušnění, ale musí mít po 28 dnech minimálně 75 % pevnosti referenčního vzorku betonu. Naopak často působí přísady pozitivně na množství záměsové vody. Pro stejnou zpracovatelnost směsi sníží množství vody přibližně o 2 % na 1 % provzdušnění. Zkoušky se musí provádět pro směsi při stejné konzistenci.

[1][2][6][n1]



Obr. 7 – Vliv provzdušnění na tlakovou pevnost betonu v závislosti na vodním součiniteli [2]

Vybrané komerční provzdušňovače s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaheným na hmotnost cementu:

- STACHEMA [v1]
Microporan: provzdušňující přísada na bázi vodného roztoku abietanu sodného, dop. dávka okolo 0,1 %, v čerstvém betonu působí plastifikačně
- SIKA [v3]
Fro-V: provzdušňující přísada na bázi solí, dop. dávka 0,2 – 0,8 %, v čerstvém betonu působí plastifikačně
- MAPEI [v4]
MapeplastPT: provzdušňující přísada na bázi povrchově aktivních látek, dop. dávka okolo 0,1 %, v čerstvém betonu působí plastifikačně

1.1.6. Stabilizační přísady

Přísady modifikující viskozitu betonu se používají pro snížení odměšování volné vody ze suspenze cementového tmelu, což v některých případech způsobuje usazování tuhých částic (tzv. „krvácení“ betonu). Stability čerstvého betonu je dosahováno zvýšením měrného povrchu tuhých částic a snížením obsahu volné vody. Mezi hlavní výhody se řadí zlepšení jakosti betonového povrchu a zvýšení soudržnosti betonu s výztuží.

Pro zvýšení plastické viskozity betonu se používají dva typy látek, prvním typem jsou adsorpční přísady a druhým typem neadsorpční přísady. Adsorpční přísady zvyšují měrný povrch tuhých částic tím, že jsou zadržovány na povrchu částic cementu. Pro tento typ se používají ve vodě rozpustné polymery na bázi celulózy nebo akrylátu. Jejich nevýhodou je snížení účinnosti superplastifikátorů tím, že si konkurují o povrch částic cementu. Z tohoto důvodu se doporučuje v betonu, kde je použit superplastifikátor, použití druhého typu stabilizačních přísad. Neadsorpční přísady snižují obsah volné vody a působí pouze na vodu tak, že se vážou na její molekuly a nesnižují tak účinnost superplastifikátorů. Používají se přísady na bázi ve

vodě rozpustných škrobů, kterých stačí malá dávka okolo 0,02 % hmotnosti jemných částic nebo oxidu křemičitého a křemičitého úletu.

[1][2][3][6]

Mezi požadavky uváděné pro směsi při stejné konzistenci patří kontrola pevnosti betonu v tlaku, která musí být po 28 dnech alespoň 80 % hodnoty referenčního vzorku betonu. Zároveň musí být splněna redukce odměšování vody alespoň o 50 % oproti kontrolní směsi. Obsah vzduchu v čerstvém betonu musí být maximálně o 2 objemová % větší než v kontrolní směsi.

[n1]

Vybrané komerční stabilizátory s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaženým na hmotnost cementu:

- STACHEMA [v1]
Stabilan DC: stabilizující přísada na bázi derivátů celulózy, dop. dávka 0,25 – 0,4 %

- SIKA [v3]
Stabilizer: stabilizující přísada na bázi modifikovaného škrobu, dop. dávka 0,1 – 1,0 %

- MAPEI [v4]
Viscostar: stabilizující přísada na bázi aktivních polymerů, dop. dávka okolo 0,1 %

1.1.7. Hydrofobizační a těsnící přísady

V případě potřeby omezení kapilární absorpce ve ztvrdlém betonu se používají chemické látky s hydrofobním charakterem, které snižují výšku kapilární elevace vody v betonu tím, že zvyšují povrchovou energii částic a zvětšují smáčecí úhel. Dále se používají těsnící látky, které zvyšují hutnost a snižují objem velkých pórů cementové matrice. Během hydratace tvoří nerozpustné sloučeniny a zmenšují tak průřez

kapilár, případně je úplně zatěsňují. Tuto funkci plní i provzdušňující přísady tím, že rozdělují souvislé kapiláry a omezují tak vztlínání.

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 8 – Rozdíl chování vody na povrchu běžného betonu a betonu s hydrofobním povrchem [2]

Používané látky jsou například na bázi solí silikonových pryskyřic nebo mýdel vápenatých a hlinitých (např. stearát vápenatý), u kterých je dávkování mezi 1 až 3 %. Další používanou látkou je silan, který se aplikuje nejenom jako přísada, ale dá se dodatečně použít i jako nástřik na povrch betonu.

Účinky hydrofobizačních přísad:

1. Snižují vlhkost v betonu
2. Baktericid, fungicid, zamezení růstu mechů a lišejníků na povrchu

[1][2][6]

Požadavky pro tyto přísady se zkouší na směsi se stejnou konzistencí nebo vodním součinitelem jako u kontrolní směsi. Je potřeba snížení kapilární absorpce a zkouší se 7 dní po 7 dnech ošetřování a musí být o 50 hmot. % nižší a po 90 dnech ošetřování se zkouší 28 dní a musí být o 60 hmot. % nižší. Dále pevnost v tlaku betonu s přísadou musí dosáhnout alespoň 85 % pevnosti referenčního vzorku. Zároveň musí být obsah vzduchu v čerstvém betonu maximálně o 2 objemová % větší.

[n1]

Vybrané komerční těsnící přísady s doporučeným dávkováním od výrobce, vztaheným na hmotnost cementu:

- SIKA [v3]
Sika DM: těsnící přísada zabraňující kapilární elevaci na bázi glycerolu, dop. dávka 0,2 - 0,8 %

- MAPEI

[v4]

Idrocrete DM: těsnící přísada na bázi činidel izolujících proti vodě, dop. dávka
0,25 - 0,1 %

1.1.8. Ostatní přísady

Do této kategorie patří přísady, které nejsou specifikovány v ČSN EN 934-2 [n1], ale v určité míře se používají.

1.1.8.1. Inhibitory koroze

Hlavní funkcí této přísady je zpomalení průběhu, případně oddálení počátku koroze ocelové výztuže v betonu, u kterého dochází ke karbonataci. Inhibitory koroze jsou přísady s využitím pro vyztužený beton v agresivním prostředí, kde dochází ke korozi oceli: XC, XD a XS. Dříve se používaly při aplikaci kyselých urychlujících přísad na bázi chloridu vápenatého, které způsobovaly korozi výztuže (kap. 1.1.1.).

Nejčastěji používané chemické látky jsou na bázi dusitanu vápenatého. Inhibitory koroze vytváří jako ochranu proti korozivnímu prostředí pasivní povrch oceli. Dávkování je přibližně 2 až 3 % hmotnosti cementu. Dále se používají chemické látky na bázi organických sloučenin, např. dusitan tetra-metyl nebo tetra-etyl. U těchto chemických látek je potřeba kontrolovat a případně omezit jejich urychlující nebo zpomalující účinek v závislosti na množství dávky.

1.1.8.2. Inhibitory alkalicko-křemičité reakce

Alkalicko-křemičitá reakce způsobuje lokální rozpad betonu a vznik trhlin. Tuto rozpínavou reakci vyvolávají alkalické soli draslíku nebo sodíku a kamenivo obsahující určité formy oxidu křemičitého. Vedle inhibitorů omezujících tuto reakci je možné použít ekonomičtější způsob a to příměsí ve formě pucolánů nebo mleté strusky.

Ačkoliv alkalické soli tuto reakci vyvolávají, tak jeden z nejpoužívanějších inhibitorů je právě na bázi solí lithia. Nejspíše tato přísada převádí nerozpustné a rozpínavé soli draslíku a sodíku na rozpustné. Další používanou látkou je silan, který odpuzuje vodu potřebnou pro alkalicko-křemičitou reakci (kap. 1.1.7.).

1.1.8.3. Přísady redukující smršťování betonu

Smršťování vyvolává na povrchu betonu napětí v tahu, které pokud je větší než tahová pevnost betonu, tak dochází ke vzniku trhlinek. Tento jev lze redukovat z hlediska složení betonu nebo z hlediska ošetřování betonu. V prvním případě lze použít přísady redukující smršťování betonu během zrání, které snižují povrchové napětí vody a tím kapilární tlak.

Dávka přísady je v rozmezí 1 až 2 % hmotnosti cementu. Používají se látky na bázi glykolů a alkoholů nebo podobných organických sloučenin (propylen-glykoly). Nevýhodou je velmi vysoká cena a zároveň není zaručeno úplné zamezení vzniku trhlinek. Lepších výsledků je možné dosáhnout v kombinaci s vyztužením vláknou, kdy je možné provádět konstrukce bez porušení a zároveň bez velkých požadavků na ošetřování. Další používané přísady omezující smršťování betonu jsou přísady expanzní (1.1.8.9).

1.1.8.4. Biocidní přísady

Zlepšují trvanlivost betonu tím, že omezují biologickou korozi betonu způsobenou následujícími mikroorganismy:

- bakterie: rozrušování cementového kamene
- plísně: estetické závady povrchu, zdravotní závadnost
- řasy: vyplňování povrchových trhlinek betonu pod vodou
- lišejníky: narušování povrchu objemovou expanzí v trhlinách betonu, udržování vysoké obsahu vody v betonu

Každá konstrukce obsahuje mikroorganismy a k jejímu ohrožení stačí, aby nastalo příznivé mikroklima. Ve své podstatě jsou důsledky biokoroze obdobné jako u chemické koroze, pouze s rozdílem v původu působících chemických látek. Mezi požadavky na tyto přísady patří zdravotní nezávadnost, nesmí mít nepříznivý vliv na vlastnosti betonu a pH musí být alespoň 8.

1.1.8.5. Plynotvorné přísady

Způsobují chemickou reakci s cementovým tmelem při míchání, která má za důsledek vznik plynu a následné nakypření betonu. Používají se pro výrobu lehkých betonů, jako je například pórobeton, kde se používá při výrobě hliníkový prášek, který reaguje v betonu za vzniku vodíku.

1.1.8.6. Pěnotvorné přísady

Produkují v čerstvém betonu během míchání pěnu - stálé vzduchové bubliny a zlepšují tak zpracovatelnost.

1.1.8.7. Odpěňovací přísady

Odstraňují z čerstvého betonu pěnu, tedy nadměrné množství vzduchu, která je například vedlejším následkem použití jiné přísady (např. plastifikátory).

1.1.8.8. Adhezní přísady

Zvyšují soudržnost různě starých vrstev betonu, případně přídržnost betonu k podkladu z jiného materiálu.

1.1.8.9. Expanzní přísady

Způsobují mírné, ale trvalé objemové rozpínání betonu v průběhu hydratace cementu. Z tohoto důvodu se dají používat také jako přísady omezující smršťování betonu, kdy naopak dochází ke zmenšování objemu v důsledku autogenního smršťování.

[1][2][5][6]

1.2. Příměsi

Ačkoliv nejsou příměsi tématem této práce, tak budou stručně zmíněny, a to z důvodu požadovaného použití kamenné moučky jako příměsi do betonové směsi. Tyto doplňkové složky se vyskytují ve formě jemných sypkých částic a jejich dávkování je ve značně větším množství, než tomu je u přísad, a proto je nutné započítávat je do objemové skladby betonu. To je důvod, proč se minerální příměsi odlišují od chemických přísad.

Příměsi se přidávají, stejně jako přísady, do betonové směsi za účelem zlepšení některých vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Dělí se na dva typy, které se vzájemně liší účastí při procesu hydratace cementu.

1.2.1. Příměsi téměř inertní

Tento typ se víceméně na procesu hydratace nepodílí, ale není to zcela vyloučeno. A to proto, že nejmenší zrna se mohou tvorby cementového kamene účastnit. Velikosti zrn se pohybují u těch největších do 0,25 mm a nejčastěji se vyskytují příměsi ve formě tzv. filleru, tedy přírodní moučky (v našem případě kamenná moučka). Požadavky na fillery jsou specifikovány v *ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu*. Dále jsou používány práškové pigmenty pro dosažení barevných odstínů betonu s požadavky dle *ČSN EN 12878 Pigmenty pro vybarvování stavebních materiálů na bázi cementu a vápna – Specifikace a zkušební postupy*.

Fillery mají vliv na reologické vlastnosti a hutnost betonu. Snižují mezerovitost kameniva vlivem velmi jemných zrn a tím zlepšují křivku zrnitosti kameniva. Jemná zrna mají vliv na vnitřní tření čerstvého betonu a tím zlepšují zpracovatelnost a omezují segregaci. Zvýšení hutnosti betonu ovlivní odolnost betonu vůči okolnímu prostředí, například snížení hloubky průsaku vody. Na druhou stranu ale zvyšují potřebné množství záměsové vody a tím částečně snižují pevnost a zvyšují možné smrštění.

Barevné pigmenty dodávají betonu různé barevné odstíny a utvářejí tak probarvené betony. Výhodou je rovnoměrně rozmístění pigmentů v celé hloubce betonové směsi a je tak zachována stejná barva i při poškození povrchu, na rozdíl od povrchových úprav. Na konečný barevný odstín betonu má velký vliv použitý odstín cementu a zbarvení kameniva. Při použití běžného portlandského cementu šedé barvy dochází k útlumu jasu barev, světlých odstínů lze tedy dosáhnout jen s použitím cementu bílé barvy. Používají se většinou čisté oxidy kovů, které jsou dlouhodobě stálé, ale jsou nákladné. Pigmenty mají různé barvicí schopnosti, při použití vysoce barvicích je obvykle dostatečná dávka okolo 5 % hmotnosti cementu pro sytou barvu. Pigmenty jsou dostupné ve formě granulí, prášku nebo suspenzí. Probarvování se nejčastěji provádí červenými, hnědými, černými, případně žlutými pigmenty, které jsou tvořeny barevnými oxidy železa. Méně běžné jsou pigmenty bílé, modré a zelené, pro které se používají jiné chemické látky (bílá - oxid titaničitý, modrá - kobaltová modř, zelená - zelený oxid chromu).

1.2.2. Pucolány nebo latentně hydraulické příměsi

Na rozdíl od prvního typu jsou tyto příměsi schopny podílet se na hydrataci cementu, ale pouze v případě, že tato reakce už probíhá. Mezi pucolány patří popílek vyhovující *ČSN EN 450-1 Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*) a mikrosilika vyhovující *ČSN EN 13263-1 Křemičitý úlet do betonu - Část 1: Definice, požadavky a kritéria*. Mezi latentně hydraulické příměsi potom vysokopecní struska. Některé tyto látky se používají jako součásti směsných cementů. Dávkování dle *ČSN EN 206*.

Popílek je produktem spalování uhlí a lze ho použít tedy jako pucolán, kdy může nahradit část cementu a není ovlivněna konečná pevnost betonu, ale i jako příměs 1. typu, pro zvýšení podílu jemných částic. Zvyšuje hutnost a odolnost betonu vůči chemicky agresivnímu prostředí. Mezi rizika, která je nutné brát v úvahu při volbě dávky, patří například vysoký obsah oxidu vápenatého, oxidu sírového nebo chloridů. Což způsobuje objemové změny tuhnoucího betonu a trhliny, riziko koroze výztuže nebo při vyšší dávce popílku odlučování vody.

Křemičitý úlet neboli mikrosilika, odpadní materiál některých hutnických provozů s velikostí zrn přibližně do 0,001 mm, vyniká značnou velikostí měrného povrchu a příznivě ovlivňuje pórovou strukturu betonu. Mikrosilika může nahradit část cementu a zároveň zvýšit pevnost betonu. Dále je možné zvýšit soudržnost čerstvého betonu nebo trvanlivost a odolnost ztvrdlého betonu proti vlivům vnějšího prostředí.

[5][6][7]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části práce bylo vyhodnotit vliv jednotlivých přísad na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu a navrhnout beton podle předem daných požadavků. Návrh receptury betonu je vždy ovlivněn volbou jednotlivých složek a jejich vzájemného spolupůsobení. Proto je tedy potřeba teoreticky navrženou recepturu experimentálně ověřit a následně upravit.

Návrh receptury betonu byl prováděn podle požadavků stavební firmy db Betonové jímky s.r.o., se sídlem v Bystřici nad Pernštejnem, zabývající se výrobou a realizací zejména betonových jímek a podobných konstrukcí pro nakládání s odpadními a dešťovými vodami. Receptura betonu byla navrhována s ohledem na stupně vlivu prostředí, které byly specifikovány firmou, a s ohledem na další konkrétní požadavky, které budou uvedeny dále (kap. 2).

1. Postup návrhu a zkoušení

Návrh a úprava receptury probíhaly ve třech krocích. Prvním krokem byl návrh receptury, tak aby odpovídalo množství cementu a vodní součinitel doporučeným hodnotám pro jednotlivé stupně vlivu prostředí dle *ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [n2]*. Druhým krokem bylo splnění firmou předem stanovených požadavků. Konkrétně zajištění požadované konzistence čerstvého betonu po dobu 90 minut, což bylo po dohodě se zástupcem firmy zkráceno v průběhu zkoušení jednotlivých receptur alespoň na 60 minut. Současně s nalezením receptury s vhodnou konzistencí čerstvého betonu bylo potřeba dosáhnout pevnosti ztvrdlého betonu v tlaku po 24 hodinách předběžně 20 MPa, což bylo v průběhu zkoušení specifikováno na hodnotu 17 MPa. Třetím krokem bylo zkoušení vzorků ztvrdlého betonu po 28 dnech s účelem splnit doporučené hodnoty pro jednotlivé stupně vlivu prostředí. Konkrétně pevnostní třídu dle *ČSN EN 206* a zároveň odolnost betonu proti průsaku tlakové vody a chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) podle *ČSN P 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace [n3]*, kde jsou doplněny některé parametry k *ČSN EN 206 [n2]*.

2. Požadované vlastnosti betonu

Pro dosažení požadovaných vlastností betonu byly brány v úvahu doporučené hodnoty minimálního množství cementu, maximálního vodního součinitele, minimální pevnostní třídy a případné další doporučení pro jednotlivá prostředí dle ČSN EN 206 – *Tabulka F. 1 [n2]*. Dále odolnost betonu proti průsaku tlakové vody a chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) podle ČSN P 73 2404 – *Tabulka F. 1. 1 [n3]*.

Doporučené hodnoty pro stupně vlivu prostředí, kterým musí navržený beton čelit:

1. XD3

Střídavě mokré a suché prostředí - koroze způsobená chloridy (jiné než z mořské vody)

- 320 kg/m³
- $w/c \leq 0,45$
- C 35/45
- *maximální průsak vody 35 mm*

2. XF4

Prostředí značně nasycené vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou - působení mrazu a rozmrazování

- 340 kg/m³
- $w/c \leq 0,45$
- C 30/37
- *kamenivo dle en 12620 s dostatečnou mrazuvzdorností*
- *minimální obsah vzduchu (4 %)*
- *maximální průsak vody 35 mm*
- *odpad maximálně 1000 g/m² při metodě A po 100 cyklech*

3. XA2

Vysoce agresivní chemické prostředí - působení rostlé zeminy a podzemní vody

- 320 kg/m³
- $w/c \leq 0,50$
- C 30/37
- síranovzdorný cement (dle EN 197-1 nebo národní normy)
- maximální průsak vody 35 mm

Výsledné doporučené hodnoty a vlastnosti betonu:

- minimální množství cementu: **340 kg/m³**
- maximální vodní součinitel: **$w/c \leq 0,45$**
- minimální pevnostní třída: **C 35/45**
- maximální průsak vody: **35 mm**
- maximální odpad při metodě A po 100 cyklech: **1000 g/m²**
- minimální obsah vzduchu: **4 %**
- kamenivo dle EN 12620 s dostatečnou mrazuvzdorností
- síranovzdorný cement (dle EN 197-1 nebo národní normy)

S ohledem na požadavky firmy bylo při stanovení receptury použito dodané kamenivo a Portlandský cement CEM I R 42,5. Z toho důvodu nebude použit i přes doporučení ČSN EN 206 [n2] síranovzdorný cement pro specifikované agresivní prostředí XA2. Podobně tomu je i pro dodané kamenivo, u kterého se tedy nebude ověřovat dostatečná mrazuvzdornost.

Doporučená minimální hodnota obsahu vzduchu v čerstvém betonu nemusí být brána v úvahu v případě splnění kritérií odolnosti a vodonepropustnosti pro jednotlivé stupně prostředí. Z tohoto důvodu byla spíše informativní.

Další požadované vlastnosti betonu:

- *sednutí-rozlitím čerstvého betonu minimálně 550 mm po dobu 90 (později 60) minut, tedy alespoň stupeň SF1*
- *pevnost betonu v tlaku po 1 dni 20 (později 17) MPa*

Ačkoli pro samozhutnitelný beton je doporučeno provádět více zkoušek – schopnost vyplňování, schopnost průtoku nebo odolnost proti rozměšování, tak v našem případě byla provedena pouze zkouška pro schopnost vyplňování, tedy zkouška sednutí-rozlití pomocí Abramsova kužele. Tato zkouška je považována za nejdůležitější a uvádí se jako základní požadavek pro samozhutnitelný beton v čerstvém stavu.

Posledním požadavkem pro složení betonové směsi bylo přidání kamenné moučky jako příměsi, důvodem bylo využití odpadního materiálu z těžby v kamenolomu.

3. Zkoušení betonu

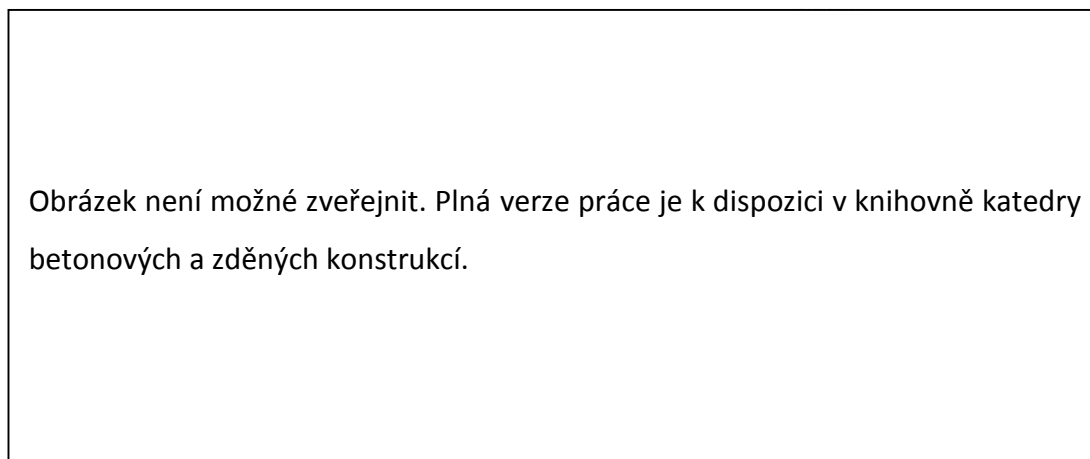
Pro stanovení požadovaných vlastností slouží u čerstvého betonu jednotlivé normy řady ČSN EN 12350 a u ztvrdlého betonu pak jednotlivé normy řady ČSN EN 12390. Výroba zkušebních těles probíhala v jedné vrstvě, jelikož se jedná o samozhutnitelný beton. U každého hodnoceného kritéria je uveden normový požadavek a příslušná norma pro jednotlivé zkoušky betonu.

1) Konzistence čerstvého betonu

- Sednutí-rozlitím pro samozhutnitelný beton minimálně 550 mm dle ČSN EN 206
- ČSN EN 12350-8 Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím. [n4]

Zkouška konzistence čerstvého samozhutnitelného betonu byla provedena pomocí zkoušky sednutí-rozlitím s využitím Abramsova kužele, kdy se posuzuje tekutost. Tato zkouška je založena na zkoušce sednutí ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Zkouška se provádí za účelem popsat schopnost vyplňování samozhutnitelným betonem. Současně s klasifikací konzistence čerstvého betonu se kontrolovalo, zda nedochází k výrazné segregaci.

Zkouška probíhala v následujících krocích. Podkladní deska, vyrobená z oceli s plochou minimálně 900 x 900 mm a vyznačenými kružnicemi o průměru 210 mm a 500 mm, byla umístěna na rovný vodorovný povrch. Forma, ve tvaru dutého komolého kužele – „Abramsův kužel“, byla umístěna na střed podkladní desky a těsně před samotnou zkouškou byla spolu s podkladní deskou navlhčena. Následně byl kužel zatížen příšlápnutím držáků, tak aby beton nemohl unikát pod formou. Během jedné aplikace byla forma zcela vyplněna čerstvým betonem a to bez zhutňování, přebytečný beton se odstranil. Následovala doba 30 vteřin, kdy byla deska očištěna od zbytků betonu a poté byla forma zvednuta během 1 až 3 vteřin jedním pohybem. Nakonec se změřil pomocí měřicího pásma největší průměr roztečeného betonu ve dvou na sebe kolmých směrech (d_1 , d_2) s přesností na 10 mm. Zprůměrováním hodnot d_1 a d_2 se stanovila výsledná hodnota sednutí-rozlitím.



Obr. 10 - Podkladní deska [n4]

Obr. 9 - Forma – Abramsův kužel [n9]

Změřené rozměry (d_1 , d_2) se nesměly lišit více než o 50 mm, v takovém případě by se musela zkouška opakovat a nastala-li by tato situace znovu, tak by beton neměl dostatečnou tekutost a tato zkouška by byla nevhodná.

V případě, že došlo k vyhovujícímu sednutí-rozlitím, tak byla z hodnot d_1 a d_2 stanovena průměrná hodnota podle následujícího vztahu. Výsledek se pak zaokrouhlil na nejbližších 10 mm.

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

kde: SF [mm] sednutí-rozlitím
 d_1 [mm] největší průměr rozlití
 d_2 [mm] průměr rozlití kolmo k d_1

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 11 - Měření sednutí-rozlitím [n10]

Klasifikace pak probíhala podle ČSN EN 206 [n2] pro samozhutnitelný beton, hodnoty pro jednotlivé stupně jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1 – Klasifikace konzistence podle hodnoty sednutí-rozlitím

| Stupeň konzistence | Hodnota sednutí-rozlitím |
|--------------------|--------------------------|
| SF1 | 550 až 650 mm |
| SF2 | 660 až 750 mm |
| SF3 | 760 až 850 mm |

2) Obsah vzduchu v čerstvém betonu

- pro XF4 alespoň 4 % dle ČSN EN 206 [n2], ale pokud vyhoví kritériu odolnosti vůči CHRL a průsaku tlakové vody, tak není potřeba provzdušňovat
- ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody [n5]

Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu bylo provedeno pomocí tlakoměrné metody využívající tlakoměrný přístroj s objemem alespoň 5 l. Podstatou zkoušky je propojení známého objemu vzduchu ve vzduchové komoře s neznámým objemem vzduchu ve vzorku betonu ve zkušební nádobě. Stupnice tlakoměru je nastavena tak, aby ukazovala procentní podíl vzduchu ve vzorku čerstvého betonu.

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 12 - Schéma tlakoměrného přístroje [n5]

V prvním kroku byla zkušební nádoba naplněna čerstvým betonem pomocí lopatky. Jelikož se jednalo o samozhutnitelný beton, tak plnění probíhalo v jedné vrstvě a bez jakékoliv formy mechanického zhutňování, a to ani po naplnění. V druhém kroku se očistila nádoba a připevnilo víka svorkami, tak aby bylo zajištěno utěsnění nádoby. Dalším krokem už bylo samotné měření, které probíhalo následovně. Nejdříve se uzavřel ventil pro přívod vzduchu a zároveň se otevřeli ventily A, B. Jedním ventilem byl plněn přístroj vodou až do té doby, než byl vytlačen přebytečný vzduch pod víkem a z druhého ventilu nezačala voda vytékat. Následně se uzavřeli ventily A, B a pomocí hustilky byl tlačěn vzduch do vzduchové komory do okamžiku, než byla nastavena počáteční hodnota na tlakoměru. Poté se otevřel hlavní vzduchový ventil. V posledním kroku byla z tlakoměru odečtena hodnota tlaku, která odpovídala výsledné hodnotě obsahu vzduchu a zaokrouhlila se s přesností na 0,1 %.

3) Pevnost betonu v tlaku po 1 a 28 dnech

- Pevnost po 1 dni minimálně 20 MPa, dodatečně specifikováno na 17 MPa
- Pevnostní třída po 28 dnech pro XD3 C 35/45 dle ČSN EN 206 [n2]
- ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [n6]

Zkouška pevnosti betonu v tlaku byla provedena pomocí zkušebního lisu. Před vlastním zkoušením byly vzorky zváženy pomocí digitální váhy a digitální šuplerou změřeny rozměry zkušebních krychlí. Jednotlivé rozměry se zaokrouhlily na 1 mm a průměrná plocha zatěžovaných povrchů na 1 mm². Při prvních pokusech sestavit vhodnou recepturu měly zkušební vzorky tvar krychle s rozměrem hrany 100 mm. Poté už se používaly vzorky tvaru krychle se základním rozměrem hrany 150 mm.

Zkušební vzorky byly osazeny do zkušebního lisu centricky tak, aby byl směr zatěžování kolmý na směr ukládání betonu do formy. Následně byly vzorky plynule zatěžovány konstantní rychlostí až do porušení. Bylo zaznamenáno maximální zatížení před porušením vzorku a použilo se pro výpočet pevnosti betonu v tlaku.

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 13 – Schéma zkoušky v tlaku [9]

V případě, že došlo k vyhovujícímu způsobu poškození vzorků, kdy byly porušeny všechny čtyři stěny krychle trhlinkami přibližně stejně, jak je patrné z *Obr. 14*, tak byly hodnoty pevnosti betonu v tlaku jednotlivých vzorků vypočteny dle následujícího vztahu. Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližších 0,1 MPa.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde: f_c [MPa] pevnost v tlaku

F [N] maximální síla při porušení

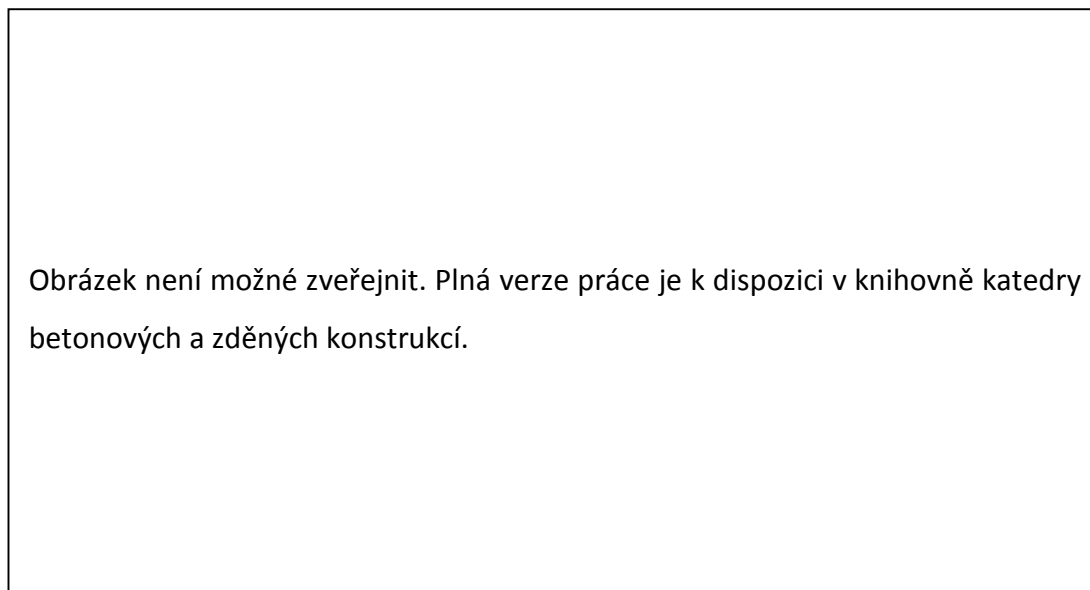
A_c [mm²] zatěžovaná průřezová plocha vzorku

Pro pevnost betonu v tlaku po 28 dnech byla navíc vypočtena charakteristická hodnota krychelné pevnosti betonu v tlaku $f_{ck,cube}$, tak aby mohla být klasifikována minimální pevnostní třída, což bylo v našem případě C 35/45, pro krychelnou pevnost tedy 45 MPa.

Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 14 - Vyhovující typy porušení [n6]

V případě, že by došlo k nevyhovujícímu porušení patrnému z následujícího obrázku (Obr. 15), tak by výsledek zkoušky nebyl uvažován.



Obr. 15 - Nevyhovující typy porušení [n6]

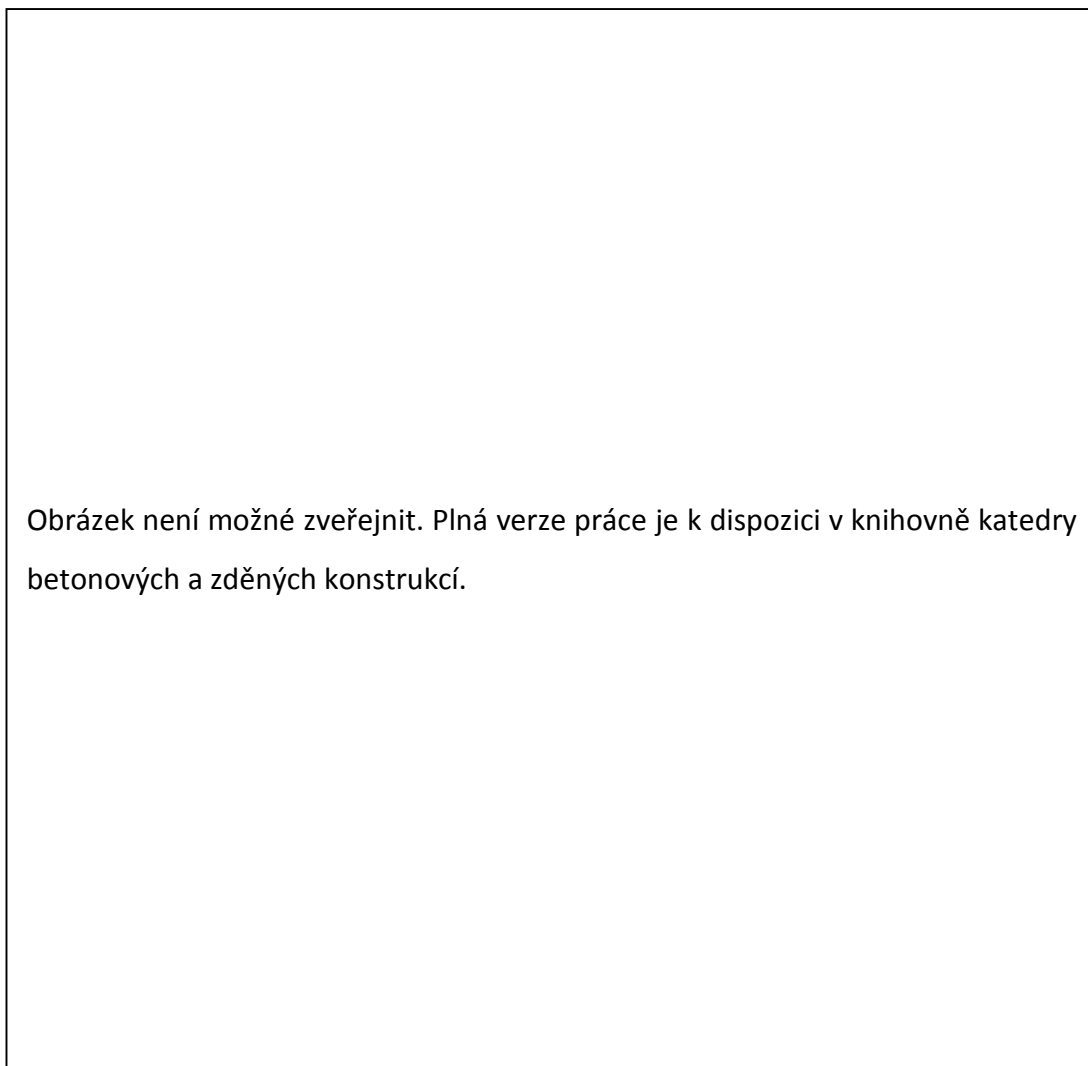
4) Odolnost betonu vůči průsaku vody

- Maximální průsak 35 mm pro XD3, XF4, XA2 dle ČSN P 73 2404 [n2]
- ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou [n7]

Zkouška odolnosti betonu je založena na působení tlakové vody na povrch zkušební tělesa ve stáří alespoň 28 dní, kterým byla v tomto případě krychle o hraně přibližně 150 mm. Tlaku vody byla vystavena část plochy vzorku, která nebyla při ukládání upravována a zároveň měla rozměry alespoň poloviny délky hrany vzorku.

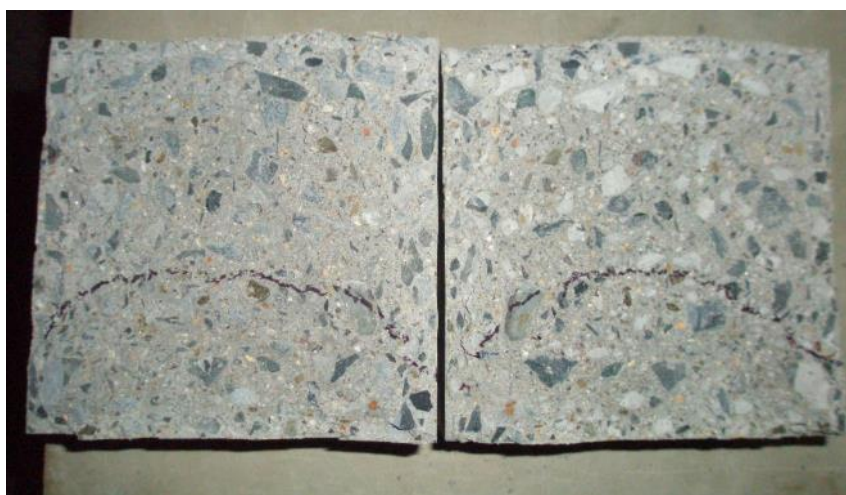
Krychle byla upnuta do zkušebního zařízení a byla vystavena působení vodního tlaku o velikosti 500 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodin. V průběhu zkoušení byl vzorek pozorován, zda nedošlo k viditelnému průsaku vody na tlaku nevystavenému povrchu, v takovém případě by bylo nutné zvážit platnost zkoušky. Po uplynutí stanovené doby byl vzorek vyjmut ze zařízení a byl podroben zkoušce příčným tahem.

Následně byla změřena maximální hloubka průsaku vody od zkoušené plochy a byla zaokrouhlena s přesností na 1 mm.



Obrázek není možné zveřejnit. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.

Obr. 16 - Schéma zkušebního zařízení [n7]



Obr. 17 – Naměřená hloubka průsaku

5) Odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování

- Max. odpad 1000 g/m² po 100 cyklech metodou A pro XF4 dle ČSN P 73 2404 [n3]
- ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek [n8]

Touto zkouškou se stanovuje odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) při cyklickém střídání kladných a záporných hodnot. Zkouška byla provedena pomocí automatického programovatelného cyklovacího zařízení. Byla použita tedy metoda A - zkoušení metodou automatického cyklování, která je založena na zkušebních zmrazovacích cyklech, kdy byl povrch vzorku střídavě ochlazován a zahříván. Jako zkušební vzorky byly použity minimálně tři krychle ve stáří alespoň 28 dní a s délkou hrany 150 mm, které byly před zkouškou uloženy ve vodě. Zkoušení byl vystaven horní povrch krychle v původním stavu a bez dalších úprav.

V prvním kroku byly zkušební krychle uloženy do misek umístěných na dně zkušebního zařízení. Na dno zařízení byla přidána voda tak, aby docházelo k lepšímu vedení tepla. Do misek, vyrobených z nekorodujícího materiálu, byl nalit roztok chemické rozmrazovací látky v takovém množství s předepsanou koncentrací, v našem případě 3 % roztok NaCl, že byl vzorek ponořen přibližně 5 mm. V druhém kroku bylo nastaveno zkušební zařízení na požadovaných 100 cyklů a poté už spuštěno. Vzorky byly vystaveny střídavému zmrazování a rozmrazování, kdy se jeden cyklus, trvající přibližně 2 hodiny, skládal ze zchlazení na teplotu - 15 °C a jejího udržení po dobu 15 minut, poté následoval ohřev na teplotu 20 °C a jejího udržení po dobu 15 minut. Po každých 25 cyklech se vyměnil roztok. Po dosažení požadovaného počtu cyklů byly vzorky vyjmuty z misek a opatrně byly ze zkoušených ploch splaveny uvolněné částice betonu zpět do misek. V posledním kroku byl vysušen odpadlý materiál v sušárně při teplotě 105 °C a následně zvážen s přesností na 0,1 g.

Výsledkem zkoušky byla hmotnost odpadu na jednotku plochy zkušební vzorku po 100 cyklech v g/m^2 . Výsledky jednotlivých vzorků byly zprůměrovány a v případě, že se jeden výsledek lišil více jako o 50 %, tak byl vyloučen. Pokud by se lišilo více výsledků, byla by zkouška neplatná.

$$p_a = \frac{m}{A}$$

kde: p_a [g/m^2] hmotnost odpadu na jednotku plochy

m [g] hmotnost odpadu

A [m^2] plocha zkoušeného povrchu krychle

K zatřídění povrchu zkušebních vzorků slouží stupně porušení podle ČSN 73 1326 [n8] uvedené v následující tabulce:

Tab. 2 – Zatřídění povrchu

| Stupeň porušení | Hmotnost odpadu na jednotku plochy [g/m^2] |
|--------------------|--|
| 1 - nenarušený | do 50 |
| 2 - slabě narušený | 50 až 500 |
| 3 - narušený | 500 až 1000 |
| 4 – silně narušený | 1000 až 3000 |
| 5 - rozpadlý | nad 3000 |

4. Specifikace materiálu

V experimentální části byly použity tyto suroviny pro výrobu jednotlivých receptur:

Cement

*Portlandský cement CEM I R 42,5 Českomoravský cement, a.s.,
výrobní závod Mokrá*

Kamenivo

Amfibolit frakce 8/16 a 4/8 Mirošov, Colas CZ, a.s.

Směs kameniva frakce 0/4 Ledce, LB MINERALS s.r.o.

Přísady

Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů s vysokým plastifikačním účinkem:

Sika ViscoCrete 20 Gold, Sika CZ s.r.o.

Stachement: 6358 FM, 508, 787, s33, 2483, Stachema CZ s.r.o.

Zpomalující přísada na bázi vodného roztoku lignosulfonátů:

Retardal 540, Stachema CZ s.r.o.

Urychlující přísada tvrdnutí na bázi vodného roztoku dusičnanu vápenatého:

Betodur A5, Stachema CZ s.r.o.

Provzdušňující přísada na bázi vodného roztoku abietanu sodného:

Microporan, Stachema CZ s.r.o.

Příměs

Kamenná moučka:

Amfibolit filler Želešice, KÁMEN Zbraslav, a.s.

Při výrobě betonu bylo použito dodané kamenivo, u kterého bylo potřeba zjistit některé vlastnosti pro návrh receptury, konkrétně objemovou hmotnost a zrnitost. Navíc byla změřena hodnota nasákavosti hrubého kameniva, aby se případně navýšilo množství záměsové vody. Proto byly provedeny následující zkoušky.

Stanovení objemové hmotnosti kameniva MIROŠOV a LEDCE

Zkoušení probíhalo dle ČSN EN 1097-6 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*.

Zkouška byla provedena pomocí objemových válců o objemu 1000 ml. Nejdříve bylo do odměrných válců odměřeno přibližně 500 ml vody V_1 . Následně bylo opatrně přidáno kamenivo o hmotnosti m . Po důkladném promíchání a setřesení a tím odstranění vzduchu z prostoru mezi zrny kameniva byla z rysek válců po 30 sekundách odečtena hodnota objemu V_2 . Následně byla vypočtena hodnota objemové hmotnosti ze vzorce:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

kde: ρ [kg/m³] objemová hmotnost kameniva
 m [g] hmotnost kameniva
 V_1 [ml] objem vody v odměrném válci
 V_2 [ml] objem vody v odměrném válci s kamenivem

Tab. 3 – Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 8/16

| m hmotnost kameniva (8/16) [g] | V_1 objem vody v odměrném válci [ml] | V_2 objem vody v odměrném válci s kamenivem [ml] |
|--|--|--|
| 499,30 | 525 | 700 |



Obr. 18 – MIROŠOV frakce 8/16

Tab. 4 – Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 4/8

| m hmotnost kameniva (4/8) [g] | V₁ objem vody v odměrném válcí [ml] | V₂ objem vody v odměrném válci s kamenivem [ml] |
|--|---|---|
| 499,15 | 510 | 680 |



Obr. 19 – MIROŠOV frakce 4/8

Tab. 5 – Naměřené hodnoty LEDCE frakce 0/4

| m hmotnost kameniva (0/4) [g] | V₁ objem vody v odměrném válcí [ml] | V₂ objem vody v odměrném válci s kamenivem [ml] |
|--|---|---|
| 499,50 | 505 | 705 |



Obr. 20 – LEDCE frakce 0/4

Výpočet objemových hmotností dle uvedeného vzorce:

$$\rho_{8/16} = \frac{0,49930}{700 \cdot 10^{-6} - 525 \cdot 10^{-6}} = 2853 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{4/8} = \frac{0,49915}{680 \cdot 10^{-6} - 510 \cdot 10^{-6}} = 2936 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{0/4} = \frac{0,49950}{705 \cdot 10^{-6} - 505 \cdot 10^{-6}} = 2498 \text{ kg/m}^3$$

Objemová hmotnost kameniva MIROŠOV byla změřena pro frakci 8/16 **2853 kg/m³** a pro frakci 4/8 **2936 kg/m³**, což přibližně souhlasí s udávanou hodnotou 2900 kg/m³ pro amfibolit. Objemová hmotnost kameniva LEDCE byla změřena pro frakci 0/4 **2498 kg/m³**.

Stanovení zrnitosti kameniva MIROŠOV a LEDCE

Zkoušení probíhalo dle ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor.

Zkouška byla provedena na sestavené sadě zkušebních sítí vzestupně dle normové řady (16/8/4/2/1/0,5/0,25/0,125/0,063). Sloupec sítí obsahoval i dno a víko. Vysušený vzorek kameniva se vsypal na sloupec sítí a sloupcem se ručně třáslo do ustálené hmotnosti. Následovalo vážení. Odebírala se jednotlivá síta, kdy se začalo největším, zvažil se zachycený materiál na síti a zaznamenala se hmotnost na jednotlivých sítích. Poté byly hodnoty zpracovány do tabulek a byly sestaveny výsledné křivky zrnitosti jednotlivých frakcí.

Tab. 6 - Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 8/16

| síto | propad | zbytek | celkový zbytek | celkový propad |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|
| | g | % | % | % |
| 16 | 117,51 | 23,57 | 23,57 | 76,43 |
| 8 | 340,70 | 68,34 | 91,92 | 8,08 |
| 4 | 39,95 | 8,01 | 99,93 | 0,07 |
| 2 | 0,05 | 0,01 | 99,94 | 0,06 |
| 1 | 0,05 | 0,01 | 99,95 | 0,05 |
| 0,5 | 0,05 | 0,01 | 99,96 | 0,04 |
| 0,25 | 0,05 | 0,01 | 99,97 | 0,03 |
| 0,125 | 0,05 | 0,01 | 99,98 | 0,02 |
| 0,063 | 0,05 | 0,01 | 99,99 | 0,01 |
| dno | 0,05 | 0,01 | 100,00 | 0,00 |
| Σ | 498,51 | 100 | | |



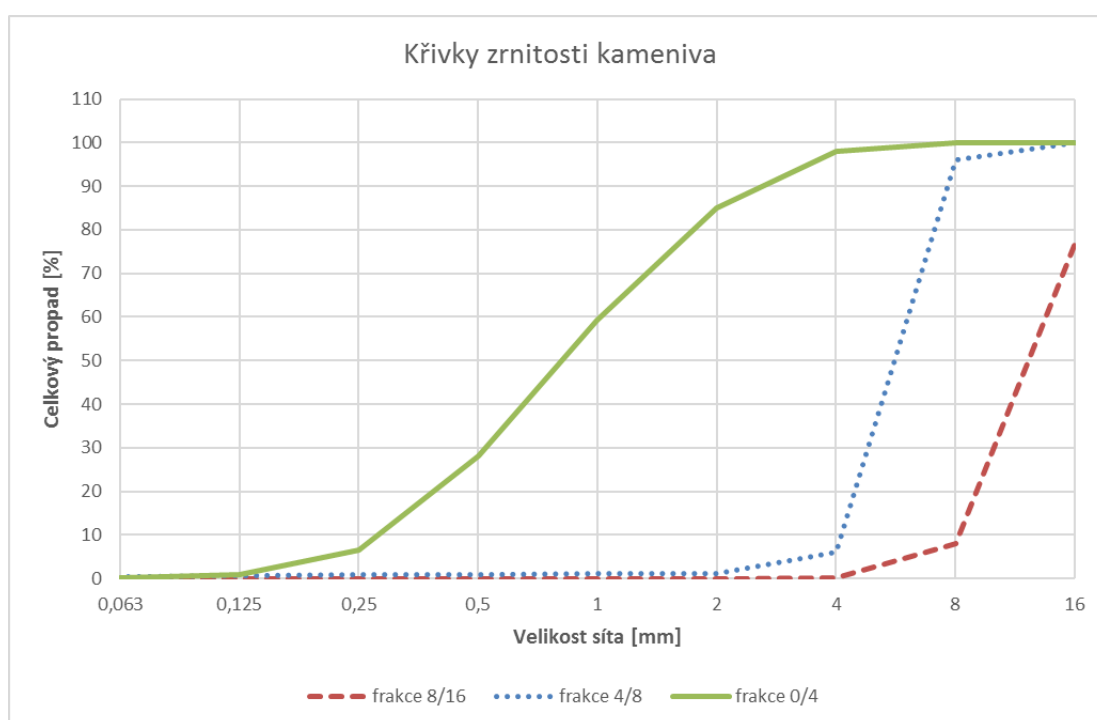
Obr. 21 - Sada zkušebních sítí

Tab. 7 - Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 4/8

| síto | propad | zbytek | celkový zbytek | celkový propad |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|
| | g | % | % | % |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 19,25 | 3,85 | 3,85 | 96,15 |
| 4 | 450,75 | 90,10 | 93,95 | 6,05 |
| 2 | 24,10 | 4,82 | 98,77 | 1,23 |
| 1 | 0,75 | 0,15 | 98,92 | 1,08 |
| 0,5 | 0,30 | 0,06 | 98,98 | 1,02 |
| 0,25 | 0,35 | 0,07 | 99,05 | 0,95 |
| 0,125 | 0,90 | 0,18 | 99,23 | 0,77 |
| 0,063 | 1,65 | 0,33 | 99,56 | 0,44 |
| dno | 2,20 | 0,44 | 100,00 | 0,00 |
| Σ | 500,25 | 100 | | |

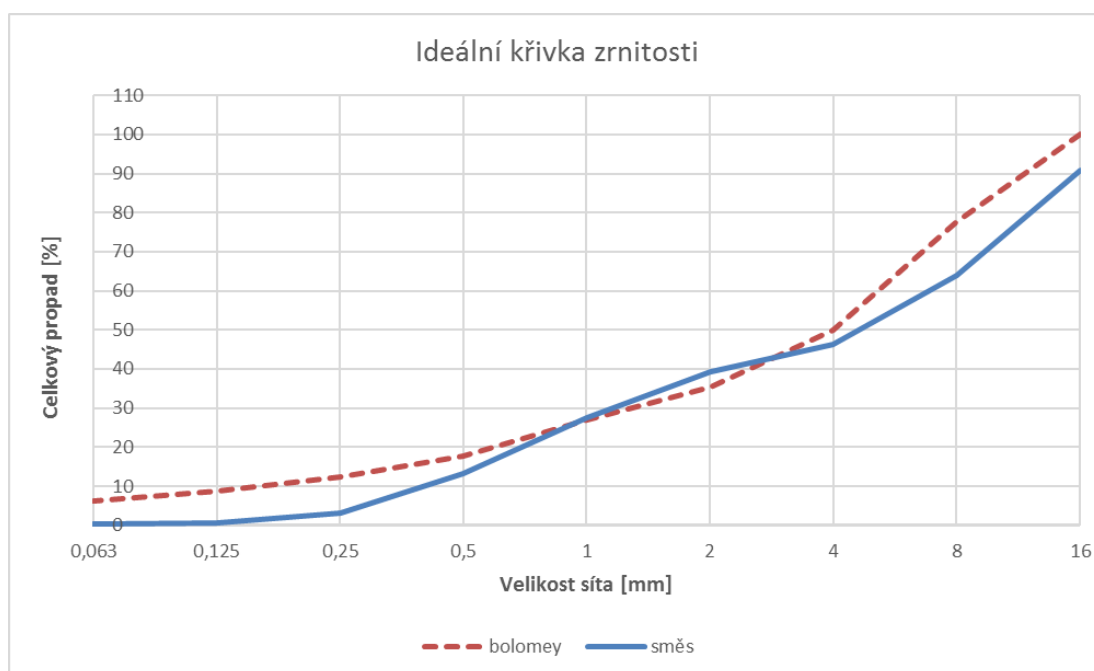
Tab. 8 - Naměřené hodnoty LEDCE frakce 0/4

| síto | propad | zbytek | celkový zbytek | celkový propad |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|
| | g | % | % | % |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 9,75 | 1,95 | 1,95 | 98,05 |
| 2 | 65,65 | 13,13 | 15,08 | 84,92 |
| 1 | 127,95 | 25,59 | 40,67 | 59,33 |
| 0,5 | 155,45 | 31,09 | 71,77 | 28,23 |
| 0,25 | 108,65 | 21,73 | 93,50 | 6,50 |
| 0,125 | 27,50 | 5,50 | 99,00 | 1,00 |
| 0,063 | 3,70 | 0,74 | 99,74 | 0,26 |
| dno | 1,30 | 0,26 | 100,00 | 0,00 |
| Σ | 499,95 | 100 | | |



Obr. 22 - Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí

Následně byla sestavena ideální křivka směsi kameniva podle Bolomeye. Poměr míchání jednotlivých frakcí kameniva 0/4 + 4/8 + 8/16 byl zvolen přibližně 3/1/2,5, ale následně byl pro jednotlivé receptury měněn.



Obr. 23 – Ideální křivka zrnitosti

Stanovení nasákavosti kameniva MIROŠOV

Zkoušení probíhalo dle ČSN EN 1097-6 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti.*

Zkouška byla provedena pomocí objemových válců o objemu 1000 ml. Nejdříve byla do odměrných válců přidána voda a poté bylo přidáno vysušené kamenivo frakce 8/16 o hmotnosti m_s . Kamenivo se ponechalo 24 hodin ve vodě a následně se zvažila hmotnost kameniva nasyceného vodou m_n . Poté byla vypočtena hodnota nasákavosti ze vzorce:

$$N = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100$$

kde: N [%] nasákavost kameniva
 m_s [g] hmotnost vysušeného kameniva
 m_n [g] hmotnost kameniva nasyceného vodou

Tab. 9 - Naměřené hodnoty kameniva MIROŠOV frakce 8/16

| m_s | m_n |
|--|---|
| hmotnost suchého kameniva (8/16) [g] | hmotnost nasyčeného kameniva (8/16) [g] |
| 497,80 | 504,05 |



Obr. 24 - Kamenivo po přidání do vody a po 24 hodinách

Výpočet nasákavosti dle uvedeného vzorce:

$$N_1 = \frac{504,05 - 497,80}{497,80} \cdot 100 = 1,3 \%$$

Nasákavost kameniva MIROŠOV byla změřena pro frakci 8/16 **1,3 %**. Větší frakce byla zvolena z důvodu nejmenšího obsahu jemných částic, které by mohly výsledek zkreslit.

5. Postup návrhu receptury

V této kapitole je popsána postupná úprava receptury betonu v jednotlivých krocích s ohledem na výsledky zkoušek předchozích receptur. Popis zkoušek není znovu uváděn pro jednotlivé receptury, ale jsou uvedeny pouze výsledky.

Na počátku zkoušení byly vyráběny pouze krychle o hraně 100 mm za účelem stanovit recepturu s dostatečnou pevností betonu v tlaku po 24 hodinách. Zároveň byla pouze vizuálně hodnocena zpracovatelnost čerstvého betonu.

Nejprve byly vyrobeny zkušební krychle z betonu podle tří receptur. Receptury byly navrženy s ohledem na normové doporučené složení a požadované vlastnosti (*viz kap. 2 – Požadované vlastnosti betonu*). Receptury měly následující zastoupení jednotlivých složek, byly vyzkoušeny dva různé superplastifikátory na bázi polykarboxylátů.

Tab. 10 – Složení receptur N1, N2, N3

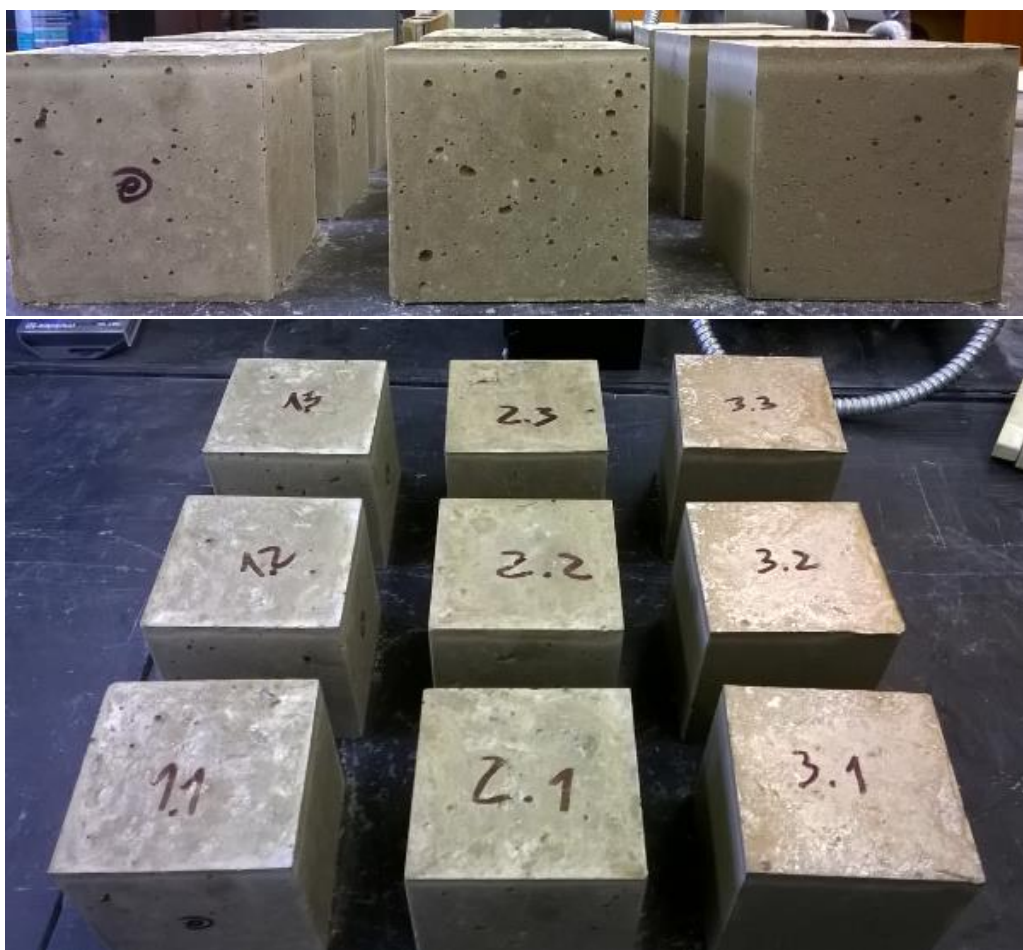
| Složky | Množství [kg/m ³] |
|---|----------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

¹⁾ Stachement 6358 FM – doporučená dávka 0,4 – 1,4 % hmot. cementu

²⁾ Stachement 508 – doporučená dávka 0,4 – 1,4 % hmot. cementu



Obr. 25 - Forma s čerstvým betonem



Obr. 26 - Zkušební krychle o hraně 100 mm, receptury N1, N2, N3

Zkušební krychle byly podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku a následně byly výsledky zpracovány do tabulek a byla vypočtena průměrná pevnost betonu v tlaku po 24 hodinách pro jednotlivé receptury.



Obr. 27 – Porušený vzorek při zkoušce v tlaku

Tab. 11 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N1)

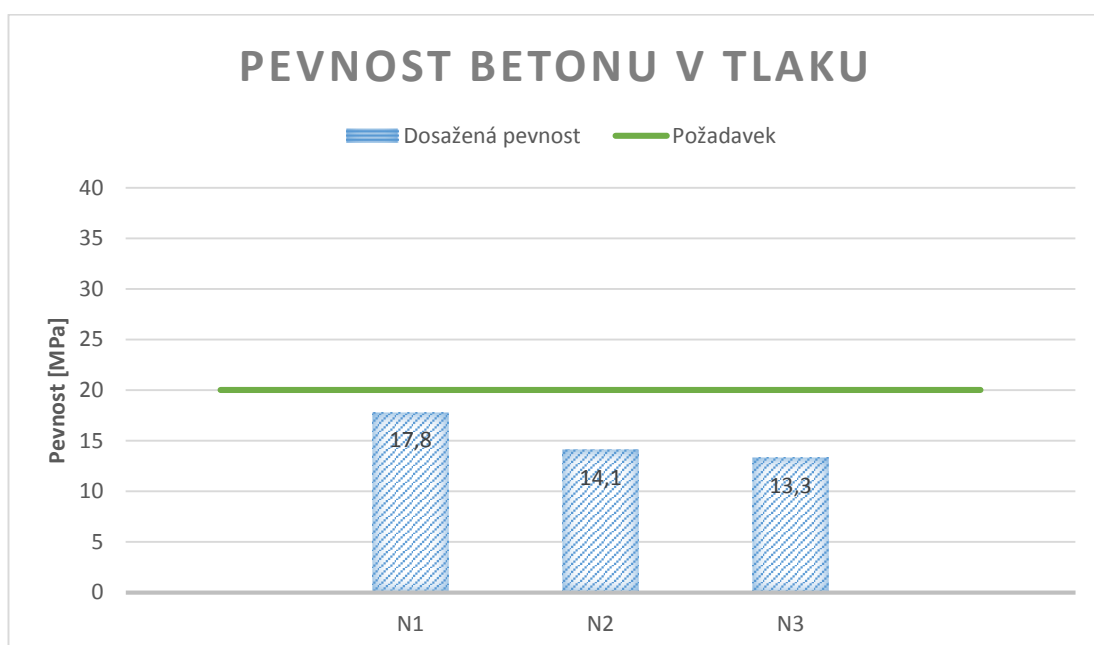
| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|---------------------|--|---------------------|-----------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 1.1 | 97 | 100 | 101 | 2401 | 2455 | 172,39 | 17,7 |
| 1.2 | 98 | 100 | 101 | 2407 | 2442 | 170,93 | 17,5 |
| 1.3 | 97 | 100 | 101 | 2393 | 2447 | 178,16 | 18,4 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 17,8 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,4 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,5 |

Tab. 12 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N2)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|---------------------|--|---------------------|-----------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 2.1 | 98 | 100 | 101 | 2382 | 2409 | 132,35 | 13,5 |
| 2.2 | 99 | 100 | 100 | 2413 | 2413 | 137,94 | 13,9 |
| 2.3 | 97 | 100 | 100 | 2357 | 2427 | 143,92 | 14,8 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 14,1 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,6 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,7 |

Tab. 13 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N3)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 3.1 | 100 | 100 | 100 | 2445 | 2425 | 138,18 | 13,7 |
| 3.2 | 101 | 101 | 100 | 2460 | 2415 | 129,53 | 12,7 |
| 3.3 | 101 | 100 | 101 | 2456 | 2421 | 136,07 | 13,5 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 13,3 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,4 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,5 |



Obr. 28 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N1, N2, N3

Z výsledků zkoušek jednotlivých receptur byl patrný větší rozdíl pouze mezi první recepturou N1 a recepturami N2, N3. To bylo způsobeno zvýšením vodního součinitele a snížením zastoupení hrubé složky kameniva, výměnou za jemnou složku. Zvýšením vodního součinitele se zlepšila zpracovatelnost čerstvého betonu, ale zároveň se zvětšila pórovitost a tím poklesla pevnost ztvrdlého betonu.

Čerstvý beton podle receptury N1 byl viditelně suchý a sypký, podle receptur N2 a N3 už měl lepší zpracovatelnost, ale pořád to nebyl samozhutnitelný beton.

V dalším kroku byly navrženy dvě receptury, které byly upraveny s ohledem na výsledky zkoušek pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách jednotlivých receptur a zároveň po vizuálním zhodnocení konzistence čerstvého betonu. Byl znovu použit původní superplastifikátor a superplastifikátor od jiného výrobce, také na bázi polykarboxylátů. Křivka zrnitosti byla rozšířena o filler, který měl zlepšit zpracovatelnost a vodotěsnost. Receptura N5 byla ukládána do forem dvěma způsoby, první byl s vibrací a druhý bez vibrace.

Z důvodu nedostatečné pevnosti betonu bylo přistoupeno k výraznému zvýšení množství cementu a tím i k značnému snížení vodního součinitele.

Tab. 14 – Složení receptur N4, N5

| Složky | Množství [kg/m ³] |
|---|----------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

¹⁾ Stachement 6358 FM – doporučená dávka 0,4 – 1,4 % hmot. cementu

²⁾ Sika 20 Gold – doporučená dávka 0,2 – 2,0 % hmot. cementu



Obr. 29 – Čerstvý beton ve formách



Obr. 30 – Zkušební krychle o hraně 100 mm, receptury N4, N5a, N5b



Obr. 31 – Porušený vzorek po zkoušce v tlaku

Zkušební krychle byly opět podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách.

Tab. 15 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N4)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost | Maximální síla | Pevnost v tlaku |
|-------------------------|----------------|-------|-------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | [g] | [kg/m ³] | [kN] | [MPa] |
| 1.1 | 101 | 97 | 100 | 2310 | 2350 | 195,46 | 19,9 |
| 1.2 | 101 | 99 | 100 | 2371 | 2373 | 230,63 | 23,1 |
| 1.3 | 100 | 99 | 100 | 2379 | 2388 | 307,56 | 30,9 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 24,7 |
| sm. odchylka | | | | | | | 4,6 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 5,6 |

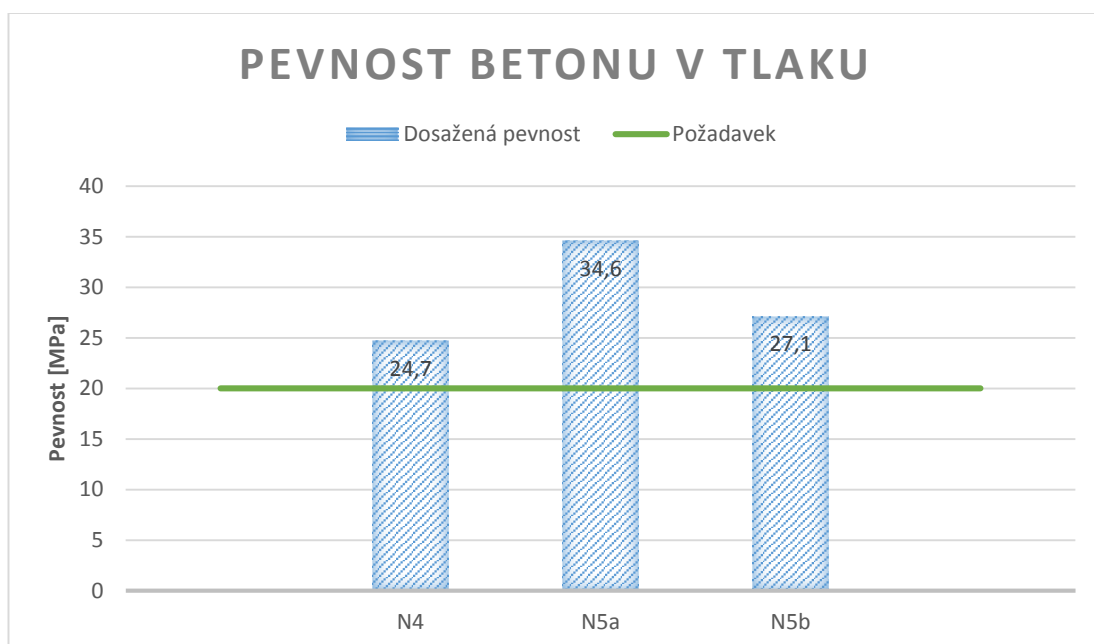
Tab. 16 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N5a s vibrací)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost | Maximální síla | Pevnost v tlaku |
|-------------------------|----------------|-------|-------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | [g] | [kg/m ³] | [kN] | [MPa] |
| 2.1 | 100 | 98 | 100 | 2365 | 2415 | 349,54 | 35,6 |
| 2.2 | 100 | 97 | 100 | 2359 | 2435 | 349,87 | 36,1 |
| 2.3 | 100 | 97 | 100 | 2364 | 2430 | 313,21 | 32,2 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 34,6 |
| sm. odchylka | | | | | | | 1,7 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 2,1 |

Tab. 17 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N5b bez vibrace)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost | Maximální síla | Pevnost v tlaku |
|-------------------------|----------------|-------|-------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | [g] | [kg/m ³] | [kN] | [MPa] |
| 3.1 | 100 | 97 | 100 | 2315 | 2392 | 264,86 | 27,2 |
| 3.2 | 100 | 99 | 100 | 2388 | 2419 | 262,09 | 26,4 |
| 3.3 | 100 | 99 | 100 | 2410 | 2437 | 273,48 | 27,5 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 27,1 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,5 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,6 |

Jak se předpokládalo, výrazné zvýšení množství cementu vedlo k významnému nárůstu pevnosti. Zároveň byl vidět značný vliv vibrace vzorku při ukládání do formy, kdy pro stejný vzorek betonu byl rozdíl průměrných pevností s vibrací a bez vibrace 7,5 MPa.



Obr. 32 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N4, N5a s vibrací, N5b bez vibrace

Z výsledků zkoušek pevnosti v tlaku jednotlivých receptur byl patrný větší rozdíl mezi recepturou N5a a recepturami N4, N5b. To bylo způsobeno vibrační vzorků při ukládání do formy.

Čerstvý beton s recepturou N4 byl velmi suchý a sypký, avšak beton s recepturou N5 už se svojí konzistencí samozhutnitelnému betonu přibližoval. Rozdíl byl způsoben nejspíše jiným superplastifikátorem a také jeho vyšší dávkou.

Po nalezení přibližného složení betonu, který se blížil požadovaným vlastnostem, bylo nezbytné udělat potřebné zkoušky. V dalším kroku tedy už byl čerstvý beton vybraných receptur podroben zkoušce zpracovatelnosti sednutí-rozlitím kužele v intervalech 0, 30, 60 a 90 minut od zamíchání směsi. Zároveň byly vyráběny krychle už o standardní velikosti hrany 150 mm, na kterých byla měřena pevnost betonu v tlaku po 24 hodinách. Z časových a kapacitních důvodů byly provedeny zkoušky pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech, zkouška CHRL a průsak tlakovou vodou pouze pro některé receptury.

V následující receptuře bylo mírně sníženo množství cementu, z důvodu překročené hodnoty pevnosti betonu po 24 hodinách. Stejně tak bylo mírně sníženo množství kamenné moučky, která zvyšuje potřebné množství záměsové vody pro zachování stejné konzistence. Dále byla zvýšena dávka záměsové vody, což vedlo ke zvýšení vodního součinitele, z důvodu zlepšení konzistence čerstvého betonu a dosažení tekutosti požadované pro samozhutnitelný beton.

Tato receptura byla provedena třemi způsoby s přidáním různých přísad. První byla navržena pouze s novým superplastifikátorem, druhá navíc obsahovala urychlovač tvrdnutí a třetí zpomalovač.

Tab. 18 – Složení receptur N7, N7+u, N7+z

| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

V prvním kroku byly jednotlivé receptury podrobeny zkoušce sednutí-rozlitím v intervalech 0, 30, 60 a 90 minut od zamíchání betonu. Byla tedy měřena tekutost čerstvého betonu.

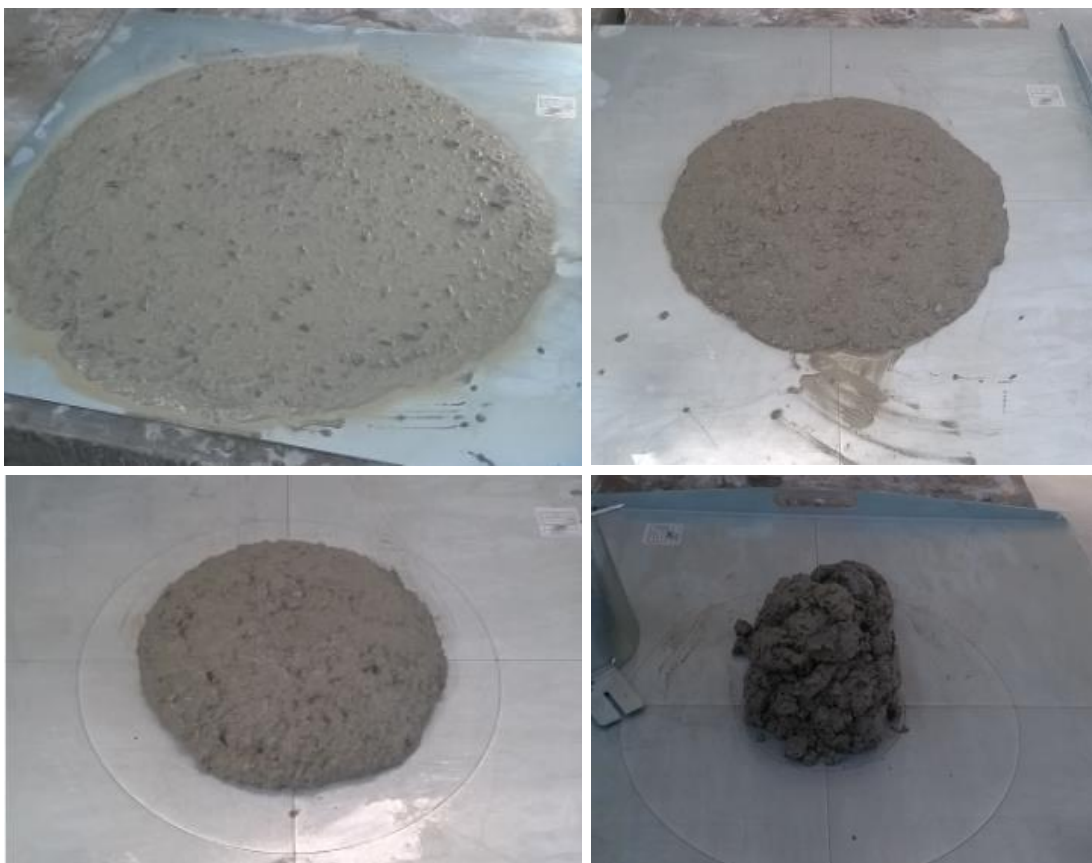


Obr. 33 – Zkouška sednutí-rozlitím

Časový průběh zkoušek jednotlivých receptur byl v intervalech t_0 , t_{30} , t_{60} a t_{90} zdokumentován a následně byly naměřené hodnoty zpracovány do tabulek.



Obr. 34 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N7, v čase t_{30} , t_{60} , t_{90}



Obr. 35 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N7+urychlovač, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90}

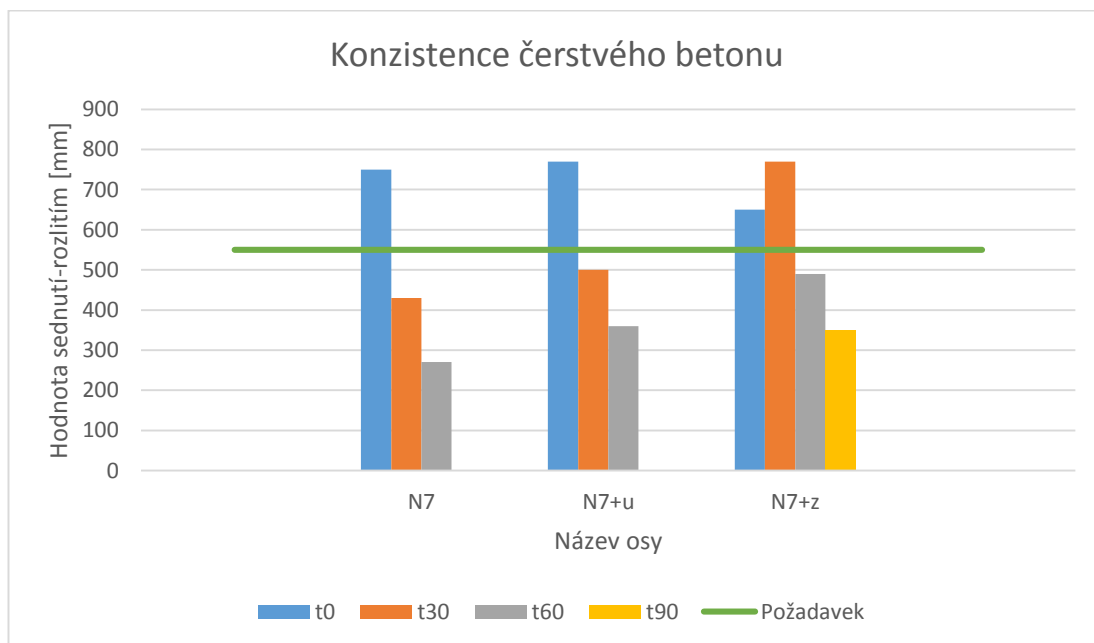


Obr. 36 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N7+zpomalovač, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90}

Tab. 19 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N7 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N7 | N7 + urychlovač | N7 + zpomalovač |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| t ₀ | 760/730 750 -> SF2 | 770/760 770 -> SF3 | 660/640 650 -> SF1 |
| t ₃₀ | 430/420 430 | 510/490 500 | 770/760 770 -> SF3 |
| t ₆₀ | 280/250 270 | 360/360 360 | 490/490 490 |
| t ₉₀ | - | - | 350/350 350 |

Jak se předpokládalo, úpravou receptury došlo ke zvýšení tekutosti čerstvého betonu a byla dosažena požadovaná konzistence pro samozhutnitelný beton. Nicméně jak je vidět z obrázků a výsledného vyhodnocení, nebyla receptura N7 ani v jedné podobě z hlediska udržení požadované konzistence po dobu 90 minut čerstvého betonu úspěšná.



Obr. 37 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

Konzistence čerstvého betonu byla pro všechny tři případy v čase t_0 podobná, pouze třetí receptura se mírně lišila a to nejspíše z důvodu nedostatečného promíchání všech složek. V dalších měřených intervalech se už projevil vliv zpomalovače na dobu zpracovatelnosti. Receptura se zpomalovačem byla jedinou, která splnila požadavky konzistence v t_{30} a blížila se jim i v t_{60} .

V dalším kroku bylo potřeba zjistit pevnost betonu v tlaku, odolnost vůči CHRL a průsaku tlakové vody, a proto byly vyrobeny zkušební krychle o standardní velikosti hrany 150 mm.



Obr. 38 - Výroba zkušebních krychlí o hraně 150 mm

Krychle byly vyrobeny v čase t_0 a t_{90} a byl pozorován rozdíl vlastností betonu. Jak je vidět z obrázku 36, doba míchání měla značný vliv na kvalitu povrchu krychlí, jediný vzorek s dávkou zpomalovače (Z90) se blížil kvalitou povrchu k vzorku vyrobenému ihned po zamíchání čerstvého betonu.



Obr. 39 – Rozdíl v kvalitě povrchů jednotlivých krychlí

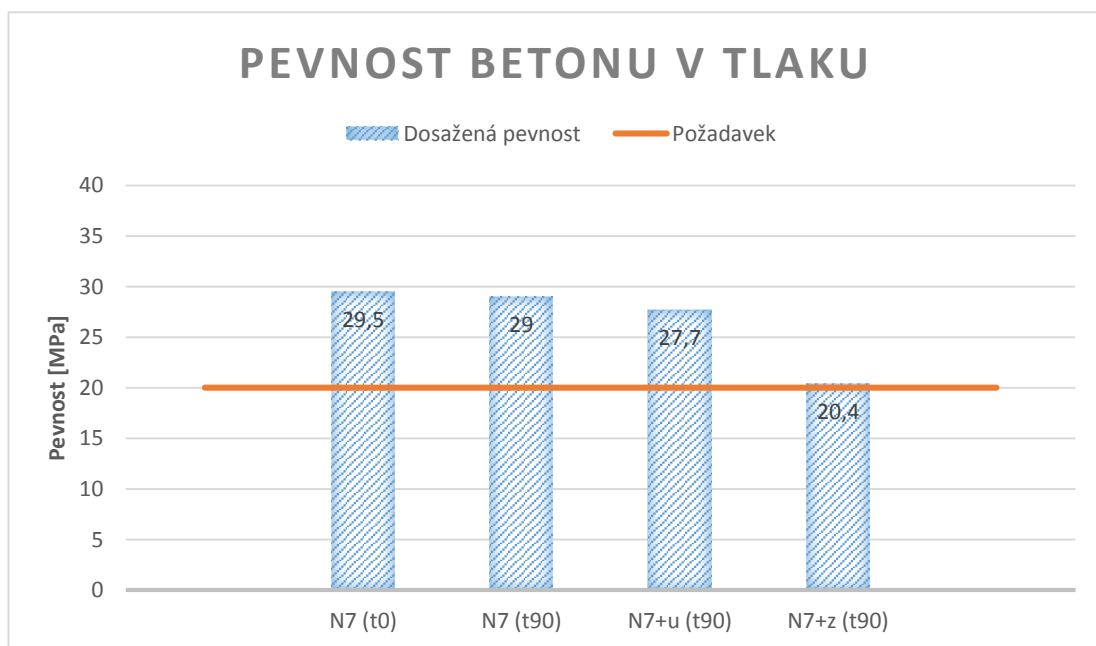
Nejprve byly zkušební krychle podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách. Postup zkoušení a výpočtu viz kap. 3 – Zkoušení betonu.

Tab. 20 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N7 vyrobené v t_0)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost | Maximální síla | Pevnost v tlaku |
|-------------------------|----------------|-------|-------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | [g] | [kg/m ³] | [kN] | [MPa] |
| R0-1 | 147 | 149 | 149 | 7740 | 2358 | 645 | 29,4 |
| R0-2 | 148 | 149 | 149 | 7825 | 2373 | 660 | 29,9 |
| R0-3 | 147 | 149 | 149 | 7725 | 2361 | 640 | 29,2 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 29,5 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,3 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,4 |

Tab. 21 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N7, N7+u, N7+z vyrobené v t_{90})

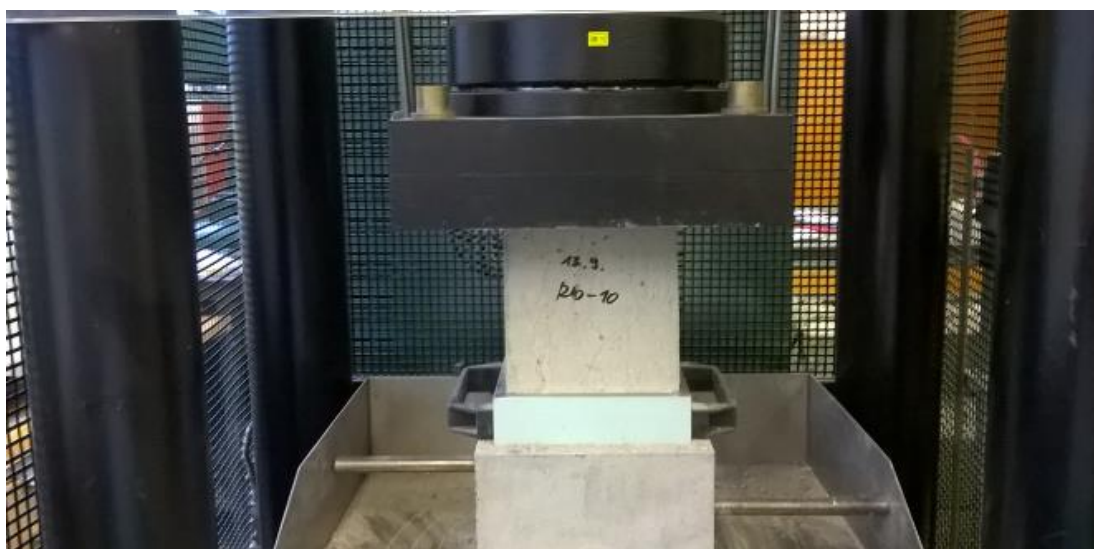
| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku | Objemová hmotnost | Maximální síla | Pevnost v tlaku |
|--------------|----------------|-------|-------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | [g] | [kg/m ³] | [kN] | [MPa] |
| R90-3 | 152 | 149 | 149 | 7685 | 2260 | 660 | 29,0 |
| U90-3 | 151 | 149 | 150 | 7638 | 2261 | 625 | 27,7 |
| Z90-3 | 150 | 150 | 150 | 7078 | 2090 | 460 | 20,4 |



Obr. 40 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7 s rozdílným časem výroby vzorků

Z výsledků lze předpokládat, že doba míchání neměla na pevnost betonu v tlaku po 24 hodinách významný vliv. Výsledky mohly být ale zkresleny z důvodu malého počtu vzorků. Přidáním urychlovače tvrdnutí nedošlo k požadovanému nárůstu pevnosti, což bylo způsobeno nejspíše nižší dávkou, než doporučuje výrobce, později proto byla použita vyšší dávka. Přidáním zpomalovače došlo k výraznému poklesu pevnosti, což souviselo s výrazným ztekucením čerstvého betonu, jak již bylo výše uvedeno.

Dalším krokem bylo stanovení charakteristické pevnosti betonu v tlaku na krychlích se stářím 28 dnů.



Obr. 41 – Zkouška pevnosti betonu v tlaku, zkušební lis

Tab. 22 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech (N7 vyrobené v t_0)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| R0-10 | 149 | 148 | 149 | 7755 | 2348 | 1392,67 | 62,9 |
| R0-11 | 149 | 150 | 149 | 7805 | 2331 | 1339,34 | 59,8 |
| R0-12 | 149 | 152 | 149 | 7840 | 2318 | 1278,75 | 56,5 |
| R0-13 | 149 | 149 | 149 | 7820 | 2356 | 1351,76 | 60,8 |
| R0-14 | 149 | 149 | 149 | 7830 | 2353 | 1363,5 | 61,2 |
| R0-15 | 149 | 153 | 150 | 7945 | 2333 | 1247,16 | 54,7 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 59,3 |
| sm. odchylka | | | | | | | 2,8 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 3,1 |

Pro představu byla vypočtena charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku $f_{c,k} = 52,6$ MPa, což splnilo minimální doporučenou pevnostní třídu betonu C 35/45.

Tab. 23 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech (N7, N7+u, N7+z vyrobené v t_{90})

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|--------------|----------------|-------|-------|------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| R90-1 | 150 | 145 | 150 | 6955 | 2143 | 845,82 | 39,0 |
| R90-2 | 150 | 149 | 150 | 7620 | 2271 | 1324,49 | 59,2 |
| U90-1 | 149 | 151 | 150 | 7495 | 2228 | 1081,45 | 48,1 |
| U90-2 | 150 | 153 | 149 | 7495 | 2193 | 1212,12 | 53,0 |
| Z90-1 | 150 | 150 | 149 | 7125 | 2125 | 947,32 | 42,2 |
| Z90-2 | 149 | 149 | 149 | 7020 | 2105 | 844,62 | 37,8 |

Z výsledků zkoušek lze předpokládat, že delší doba míchání měla vliv na dlouhodobou pevnost, ale ne v případě, že vzorek byl při ukládání do formy hutněn (R90-2). Na rozdíl od pevnosti po 1 dni při porovnání jednotlivých vzorků vyrobených v čase t_{90} , měla přidaná dávka urychlovače tvrdnutí viditelný vliv na nárůst pevnosti po 28 dnech a přidaná dávka zpomalovače neměla viditelný vliv na pevnost po 28 dnech.

V této fázi, kdy ještě nebyla dosažena požadovaná konzistence čerstvého betonu, byly pro zkoušky odolnosti ztvrdlého betonu vůči CHRL a průsaku tlakové vody použity krychle vyrobené v čase t_0 , tedy ihned po zamíchání čerstvého betonu.



Obr. 42 – Automatické programovatelné cyklovací zařízení pro zkoušení povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Při zkoušce odolnosti povrchu betonu proti působení vody a CRHL byly zkušební krychle vystaveny 100 zkušebním cyklům a následně byl vysušen a zvážen odpad. Poté byl vyhodnocen stupeň porušení.



Obr. 44 – Průběh zkoušky uvnitř zařízení



Obr. 43 – Porušený povrch krychlí vystavený zkoušení

Tab. 24 – Vyhodnocení stupně porušení

| Vzorek | Rozměry [mm] | Hmotnost při vysušení [g] | Odpad po 100 cyklech vysušený [g] | Výsledek po 100 cyklech [g/m ²] | Stupeň porušení |
|---------------|-----------------|---------------------------------|---|---|-----------------------|
| R0-4 | 150 | 7735 | 17,5 | 687 | 3 Narušený |
| | 150 | | | | |
| | 150 | | | | |
| R0-5 | 150 | 7755 | 14,8 | 581 | |
| | 150 | | | | |
| | 150 | | | | |
| R0-6 | 150 | 7740 | 24,5 | 962 | |
| | 150 | | | | |
| | 150 | | | | |
| průměr | | 7743 | 19,0 | 744 | |

Výsledná hmotnost odpadu na jednotku plochy 744 g/m² splnila požadavek maximálně 1000 g/m² a povrch byl klasifikován jako narušený.

Poslední provedenou zkouškou byla odolnost betonu vůči průsaku tlakové vody, kdy byly zkušební krychle vystaveny vodnímu tlaku po dobu 72 hodin. Poté byla krychle zlomena a byla změřena výsledná hloubka průsaku.



Obr. 45 – Krychle N7 upnuté do zkušebního zařízení v průběhu zkoušky

Tab. 25 – Vyhodnocení průměrné hodnoty průsaku

| Vzorek | Průsak [mm] | Výsledná hodnota průsaku tlakovou vodou 23 mm splnila požadavek maximálně 35 mm. |
|-------------------------|-------------|--|
| R0-7 | 20 | |
| R0-8 | 23 | |
| R0-9 | 25 | |
| Průměrná hodnota | 23 | |

V další fázi návrhu se vycházelo ze složení receptury N7, jelikož splnila všechny požadavky kromě udržení požadované doby zpracovatelnosti. První pokus byl zachovat původní dávku superplastifikátoru a zvýšit dávku zpomalovače. Druhý pokus byl zvýšit dávku superplastifikátoru a zachovat původní dávku zpomalovače. Obě receptury byly porovnány s výchozí recepturou N7+z.

Tab. 26 – Složení receptur N8, N9

| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

V prvním kroku byly obě receptury podrobeny zkoušce sednutí-rozlitím v intervalech 0, 30, 60 a 90 minut od zamíchání betonu.



Obr. 47 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N8, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90}

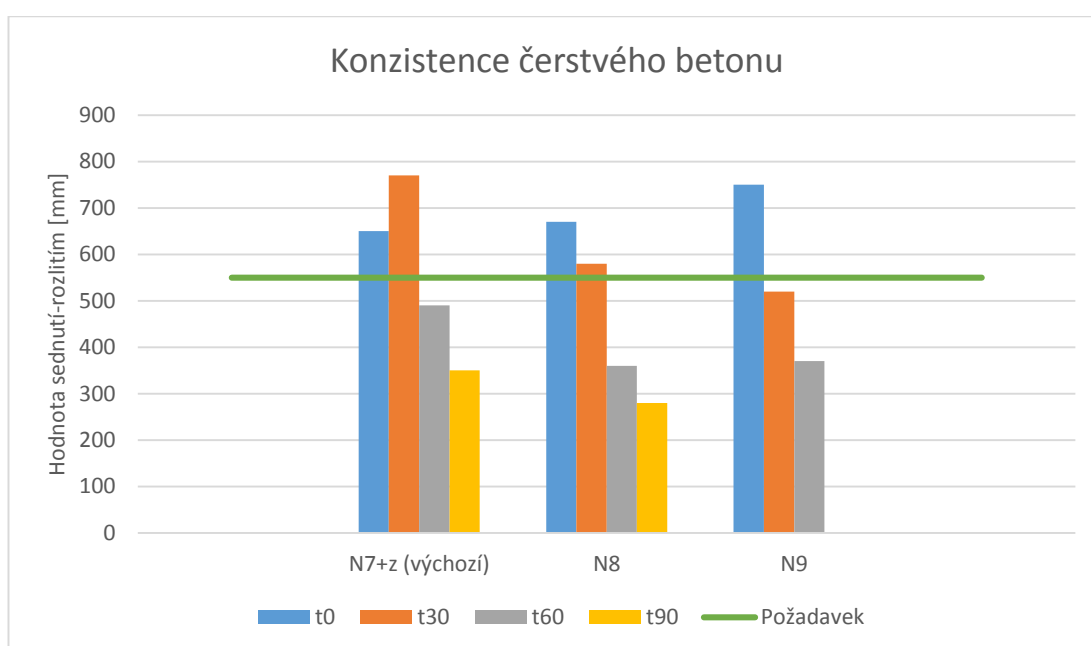


Obr. 46 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N9, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90}

Tab. 27 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N8, N9 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N7+z výchozí | N8 - větší dávka zpomalovače | N9 - větší dávka superplastifikátoru |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| t ₀ | 660/640 650 -> SF1 | 680/650 670 -> SF2 | 750/740 750 -> SF2 |
| t ₃₀ | 770/760 770 -> SF3 | 590/570 580 -> SF1 | 520/520 520 |
| t ₆₀ | 490/490 490 | 390/380 360 | 370/370 370 |
| t ₉₀ | 350/350 350 | 280/270 280 | - |

Jak je vidět z výsledků, tak zvýšením dávky zpomalovače nedošlo k udržení požadované konzistence, ale naopak došlo ke zhoršení. To bylo nejspíše způsobené překročením maximální dávky zpomalovače dané výrobcem. Stejně tak tomu bylo při zvýšení dávky superplastifikátoru, kde byl rozdíl ještě výraznější. Ani jedna receptura tedy nebyla z hlediska udržení požadované konzistence po dobu 90 minut čerstvého betonu úspěšná.



Obr. 48 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

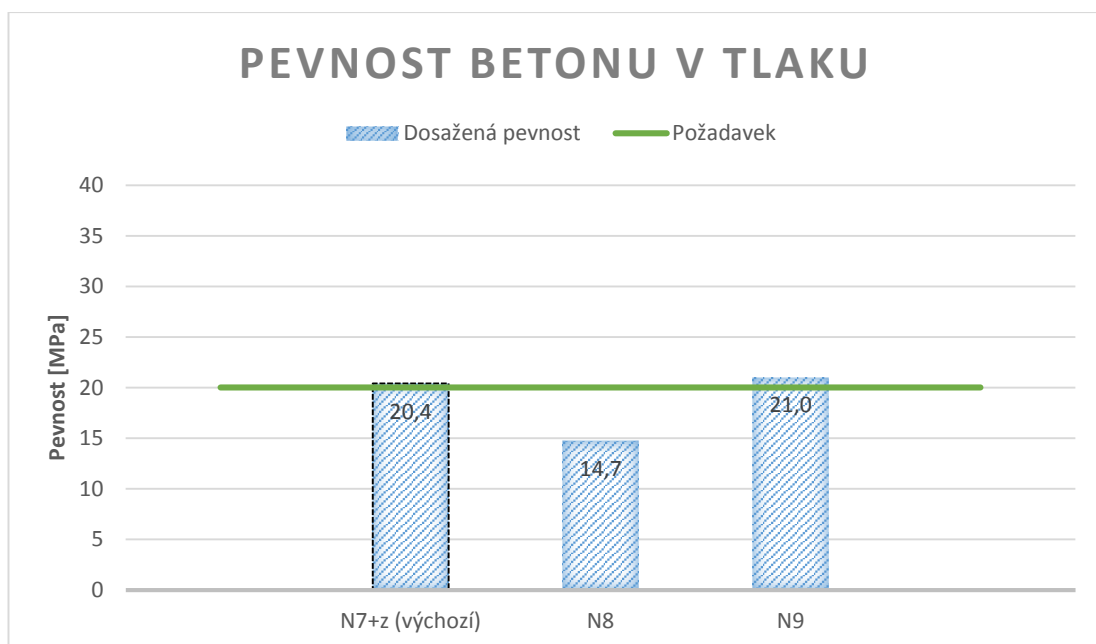
V dalším kroku byly zkušební krychle podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách.

Tab. 28 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N8 vyrobené t_{90})

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 1 | 150 | 149 | 152 | 7480 | 2208 | 395,70 | 17,7 |
| 2 | 149 | 149 | 149 | 6850 | 2064 | 289,17 | 13,0 |
| 3 | 150 | 150 | 148 | 6980 | 2114 | 299,44 | 13,4 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 14,7 |
| sm. odchylka | | | | | | | 2,1 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 2,6 |

Tab. 29 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N9 vyrobené v t_{90})

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 1 | 150 | 149 | 151 | 7360 | 2179 | 479,46 | 21,5 |
| 2 | 150 | 149 | 150 | 7360 | 2200 | 525,07 | 23,5 |
| 3 | 149 | 149 | 151 | 7195 | 2139 | 401,81 | 18,0 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 21,0 |
| sm. odchylka | | | | | | | 2,3 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 2,8 |



Obr. 49 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7+z, N8, N9

Z výsledků je patrné, že zvýšení dávky zpomalovače nad doporučenou maximální hodnotu nemělo už pozitivní vliv na úpravu konzistence, ale výrazně přispělo k poklesu pevnosti. Zvýšení dávky superplastifikátoru mělo také negativní vliv na konzistenci, ale nemělo už viditelný vliv na pevnost. Proto byly tyto pokusy o úpravu receptury neúspěšné.

Zvýšení dávky přísad nad doporučenou maximální hodnotu nebylo tedy přínosné, naopak v našem případě uškodilo. Proto byla v dalších krocích dodržována výrobcem doporučená maximální dávka přísad. Pro další receptury byla zachována dávka 1,1 % hmotnosti cementu, což odpovídalo 5 kg/m^3 .

V další fázi byla zvolena tedy jako výchozí receptura opět N7 se zpomalovačem, která se nejvíce blížila cílovým vlastnostem. Nová receptura byla ponechána ve stejném složení, pouze se vyměnil superplastifikátor, který byl také na bázi polykarboxylátů. Opět se receptura porovnávala s původní N7+z.

Tab. 30 – Složení receptury N10

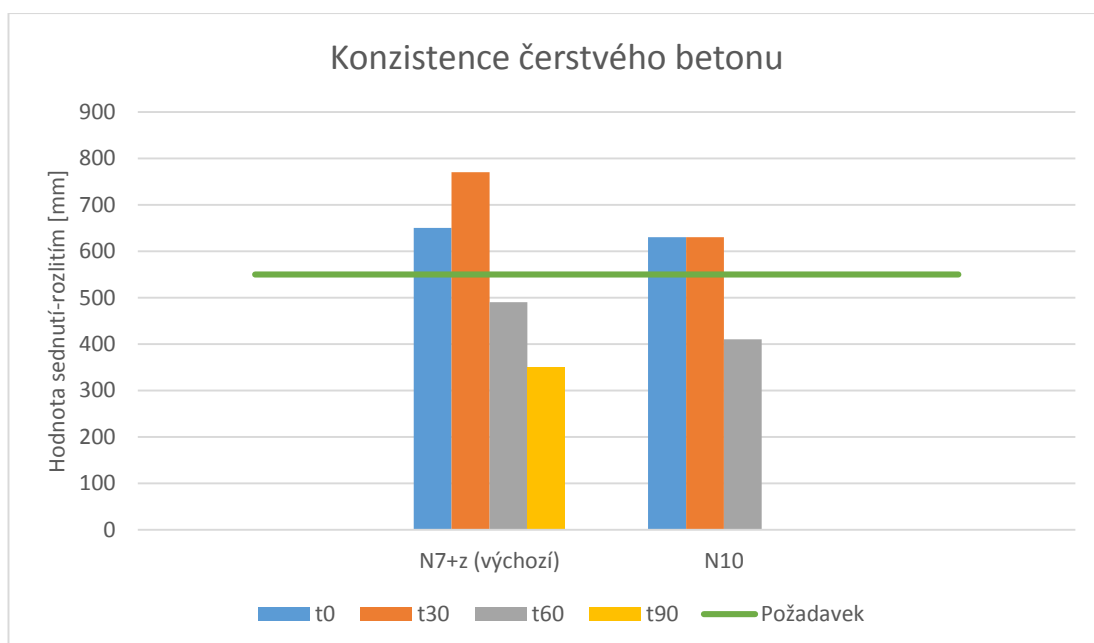
| Složka | Množství [kg/m^3] |
|---|------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

Receptura byla podrobena zkoušce sednutí-rozlítím v intervalech 0, 30, 60 a 90 minut od zamíchání betonu. Zároveň byl stanoven obsah vzduchu v čerstvém betonu.

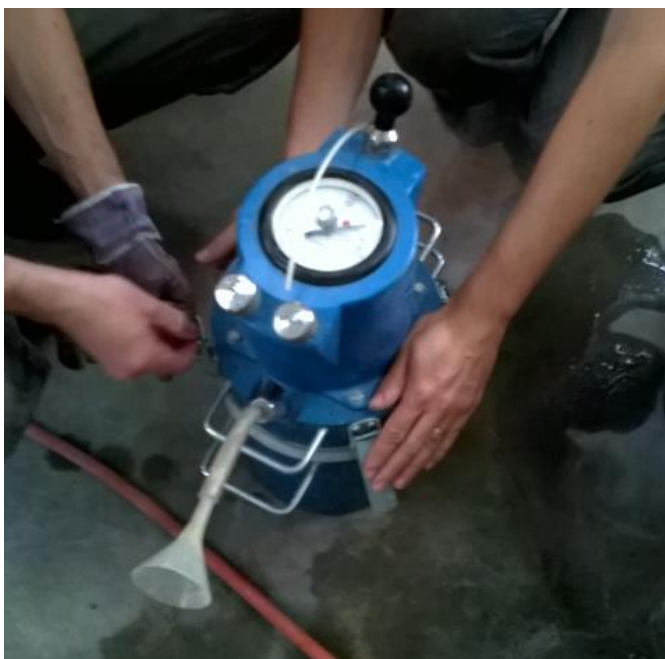
Tab. 31 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N10 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N7+z výchozí | N10 – jiný superplastifikátor |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| t ₀ | 660/640 650 -> SF1 | 650/610 630 -> SF1 |
| t ₃₀ | 770/760 770 -> SF3 | 630/620 630 -> SF1 |
| t ₆₀ | 490/490 490 | 410/400 410 |
| t ₉₀ | 350/350 350 | - |

Výsledky zkoušení konzistence ukázaly, že změnou superplastifikátoru došlo ke zhoršení tekutosti čerstvého betonu. Proto nebyl už tento superplastifikátor pro další receptury použit. Je zde patrné, jak je důležité vyzkoušet konkrétní přísady pro dané složení betonu. I když byly superplastifikátory na stejné bázi polykarboxylátů, měly odlišný vliv v čase na identickou recepturu. Z tohoto důvodu byl v další receptuře použit nový superplastifikátor.



Obr. 50 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím



V čerstvém betonu byla změřena hodnota obsahu vzduchu, a to pouze 1,6 %, v našem případě by se hodnota měla pohybovat kolem 4 %.

Obr. 51 – Tlakoměrný přístroj

Jak již bylo výše zmíněno, tak v další receptuře byl vyzkoušen nový superplastifikátor, který byl ale opět na bázi polykarboxylátů. Zároveň byl použit provzdušňovač z důvodu nízkého obsahu vzduchu v čerstvém betonu.

Tab. 32 – Složení receptury N11

| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

Receptura byla podrobena zkoušce sednutí-rozlitím v intervalech 0, 30, 60 a 90 minut od zamíchání betonu. Zároveň byl stanoven obsah vzduchu v čerstvém betonu.

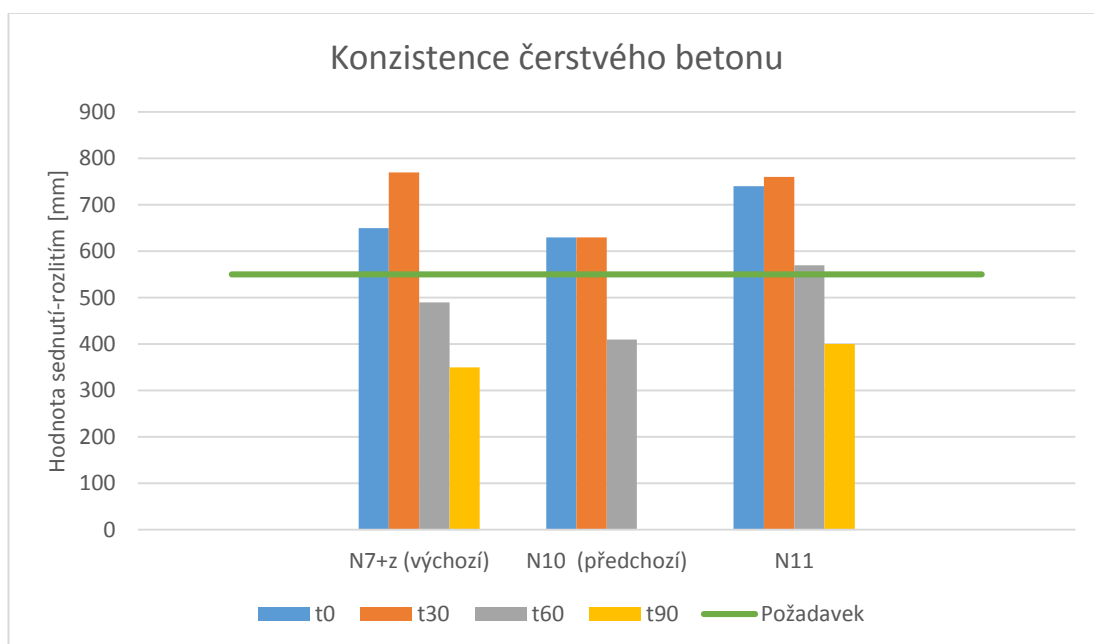


Obr. 52 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N11, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90}

Tab. 33 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N11 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N7+z výchozí | N10 – jiný superplastifikátor | N11 – nový superplast. + provzdušňovač |
|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| t_0 | 660/640 650 -> SF1 | 650/610 630 -> SF1 | 750/720 740 -> SF2 |
| t_{30} | 770/760 770 -> SF3 | 630/620 630 -> SF1 | 760/750 760 -> SF3 |
| t_{60} | 490/490 490 | 410/400 410 | 570/570 570 -> SF1 |
| t_{90} | 350/350 350 | - | 410/380 400 |

Z výsledků zkoušek konzistence bylo patrné, že nejspíše změnou superplastifikátoru došlo konečně k požadovanému zvýšení tekutosti čerstvého betonu, avšak byl použit i provzdušňovač. Proto byl tento konkrétní superplastifikátor použit i pro další receptury. Znovu se potvrdilo, jak je důležité experimentálně vyzkoušet konkrétní přísady pro dané složení betonu, přestože byly superplastifikátory na stejné bázi polykarboxylátů, měly odlišné chování v čase.



Obr. 53 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

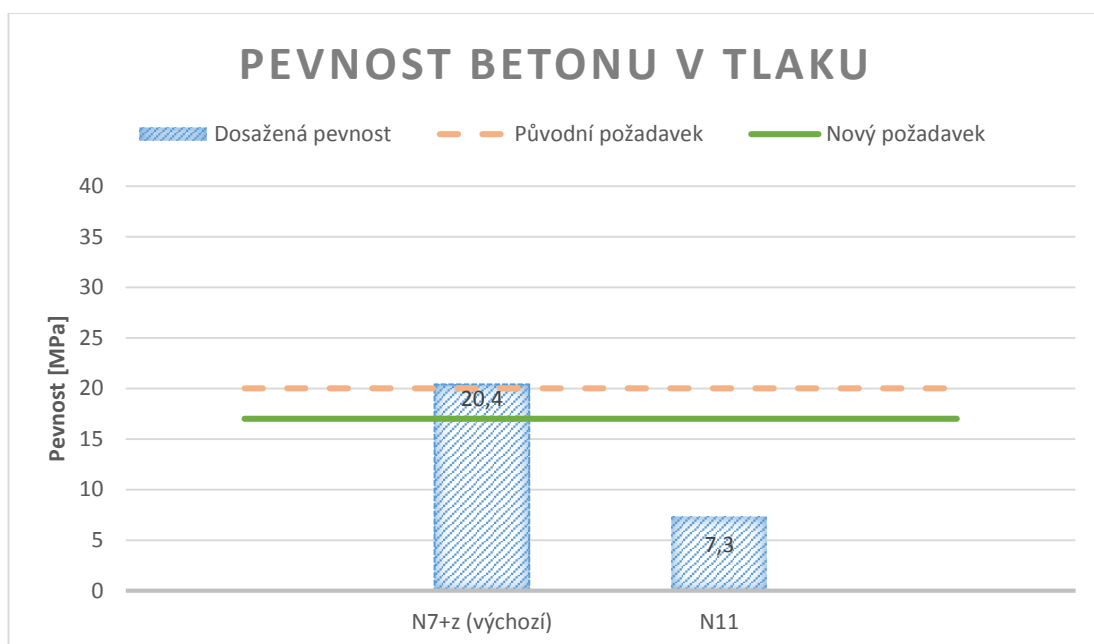
Tekutost čerstvého betonu vyhověla v prvních třech měřených intervalech požadavků, ale už nebyla dostačující v posledním měřeném intervalu po 90 minutách míchání. Po konzultaci se zadavatelem byl snížen požadavek na dobu udržení požadované konzistence na 60 minut, což bylo v tomto případě splněno.

V čerstvém betonu byla změřena hodnota obsahu vzduchu 4,0 %, což už odpovídalo požadavkům.

V dalším kroku byly zkušební krychle podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách.

Tab. 34 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N11 vyrobené v t₉₀)

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|---------------------|--|---------------------|-----------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 1 | 150 | 151 | 149 | 6179 | 1827 | 148,37 | 6,6 |
| 2 | 150 | 149 | 150 | 6098 | 1818 | 177,75 | 7,9 |
| 3 | 150 | 150 | 151 | 6071 | 1799 | 167,56 | 7,5 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 7,3 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,6 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,7 |



Obr. 54 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7+z, N11

Stejně jako tomu bylo pro požadavek na dobu konzistence, tak po konzultaci se zadavatelem došlo i k úpravě minimální pevnosti betonu v tlaku po 1 dni a byla jako dostatečná hodnota stanoveno 17 MPa.

Z výsledků zkoušek byl patrný významný vliv provzdušnění na pevnost betonu v tlaku po 1 dni. Jak je uvedeno v teoretické části, tak s 1 % provzdušnění by měla pevnost klesnout přibližně o 5 %. V našem případě došlo ke zvýšení obsahu vzduchu o necelé 3 % a pevnost po 1 dni klesla přibližně o 64 %. Tak výrazný rozdíl pevnosti oproti výchozí receptuře N7 byl způsoben nejspíše kombinací nově použitých přísad. Byl zároveň použit provzdušňovač a nový superplastifikátor, který výrazně zvýšil tekutost a prodloužil dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu, což negativně ovlivnilo počáteční nárůst pevnosti. Z tohoto důvodu bylo vyloučeno použití provzdušňovače v dalších recepturách.

Dalším pokusem bylo snížení množství filleru, který svým měrným povrchem zvyšuje potřebu záměsové vody pro zachování dané konzistence, s cílem zvýšit tekutost čerstvého betonu. Jako výchozí receptura byla zvolena opět N7, kdy bylo pouze sníženo množství kamenné moučky o 20 kg/m³.

Tab. 35 – Složení receptury N7b

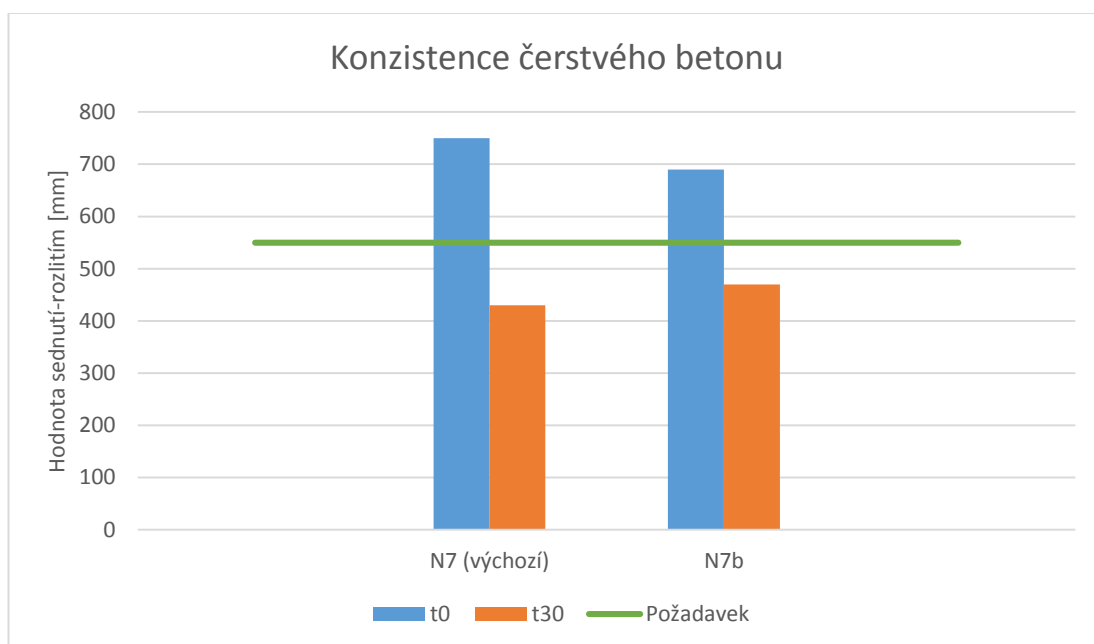
| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |



Obr. 55 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N7 a N7b v čase t_{30}

Tab. 36 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu 7b podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N7 výchozí | N7b – snížení množství filleru |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| t_0 | 760/730 750 -> SF2 | 690/680 690 -> SF2 |
| t_{30} | 430/420 430 | 480/460 470 |



Obr. 56 - Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím

Úprava neměla výrazný vliv na tekutost čerstvého betonu, v čase t_{30} byla naměřená hodnota pouze mírně vyšší. Pro náš případ se tedy nehodilo výrazněji snižovat množství filleru, který zvyšuje hutnost ztvrdlého betonu a zvyšuje tak i například odolnost betonu vůči průsaku tlakové vody. Množství tedy bylo v dalších recepturách sníženo pouze nepatrně.

Jak ukázaly výsledky předchozí receptury N11, tak nový superplastifikátor měl výrazný vliv na konzistenci a i udržení požadované tekutosti čerstvého betonu po určitou dobu, ale zároveň i podstatný vliv na pokles jednodenní pevnosti ztvrdlého betonu. Z toho důvodu bylo vyloučeno další použití zpomalovače a provzdušňovače a pro dosažení stanovené jednodenní pevnosti bylo přistoupeno k aplikaci urychlovače. Na rozdíl od výchozí receptury N7+u už bylo v tomto případě dodrženo výrobcem doporučené rozmezí a byla použita vyšší dávka urychlovače.

Tab. 37 – Složení receptury N12

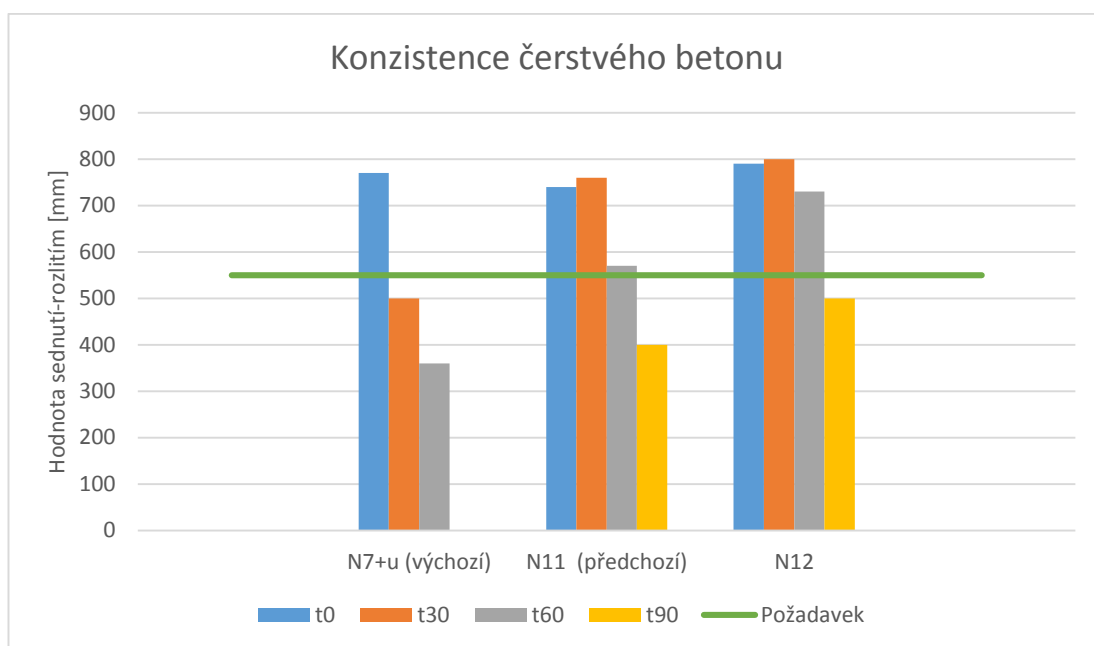
| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

Receptura byla opět podrobena zkoušce sednutí-rozlitím v intervalech 0, 30, 60 a 90 minut od zamíchání betonu.

Obr. 57 - Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N12, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90}

Tab. 38 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N12 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N7+u výchozí | N11 – nový superplast. + zpomalovač + provzdušňovač | N12 – nový superplast. + urychlovač |
|-----------------------|---------------------------------|---|-------------------------------------|
| t ₀ | 760/770 770 -> SF3 | 750/720 740 -> SF2 | 790/780 790 -> SF3 |
| t ₃₀ | 510/490 500 | 760/750 760 -> SF3 | 820/780 800 -> SF3 |
| t ₆₀ | 360/360 360 | 570/570 570 -> SF1 | 750/700 730 -> SF2 |
| t ₉₀ | - | 410/380 400 | 510/490 500 |



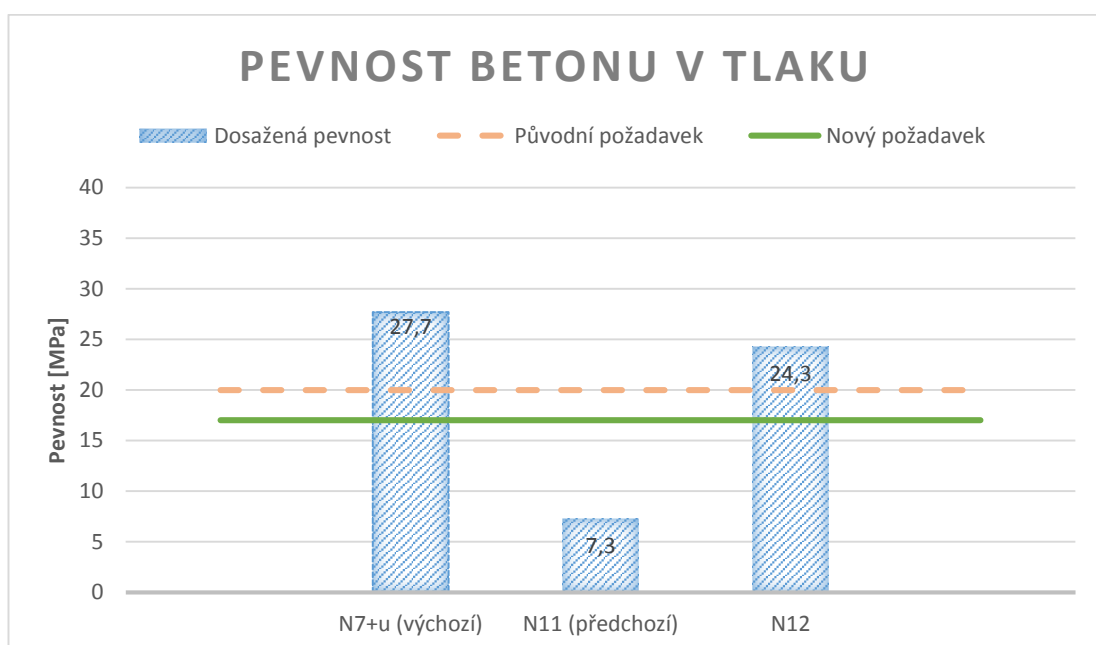
Obr. 58 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

V čerstvém betonu bylo po zamíchání viditelné značné množství vody a v prvních dvou intervalech t₀ a t₃₀ docházelo k výrazné segregaci. Oproti předchozí receptuře N11 došlo nejspíše použitím vysoké dávky urychlovače tvrdnutí v kombinaci s mírným snížením množství filleru ke zvýšení tekutosti. Proto bylo v dalším kroku sníženo množství záměsové vody.

V dalším kroku byly zkušební krychle podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách.

Tab. 39 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N12 vyrobené v t_{90})

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 1 | 149 | 149 | 147 | 7705 | 2361 | 499,19 | 22,5 |
| 2 | 150 | 149 | 149 | 7780 | 2338 | 542,45 | 24,3 |
| 3 | 149 | 149 | 149 | 7835 | 2359 | 581,07 | 26,1 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 24,3 |
| sm. odchylka | | | | | | | 1,5 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 1,8 |



Obr. 59 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7+u, N11, N12

Jak již bylo dříve zmíněno, nový superplastifikátor měl značný vliv na pokles jednodenní pevnosti, a proto byla i přes vyšší dávku urychlovače tvrdnutí pevnost nižší, než v případě výchozí receptury N7+u, kde nebyl použit tak účinný superplastifikátor. Naopak nárůst jednodenní pevnosti vůči předchozí receptuře N11 se shodným superplastifikátorem byl způsoben nahrazením provzdušňovače a zpomalovače urychlovačem tvrdnutí.

Z výsledků je patrná poměrně velká rezerva jednodenní pevnosti, proto byla v dalším kroku snížena dávka urychlovače i s ohledem na dlouhodobou pevnost, která by tak nejspíše byla redukována. Zároveň bylo sníženo množství záměsové vody.

Tab. 40 – Složení receptury N12b

| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |



Obr. 60 – Zkouška sednutí-rozlitím, receptura N12b, v čase t_0

V posledním případě došlo k menším problémům s promícháním celého objemu betonu z důvodu velkého množství. S ohledem na fakt, že se jednalo z časových důvodů o poslední pokus sestavit vhodnou recepturu, byly i přesto vyrobeny zkušební krychle.

Tab. 41 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N12b podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím

| Sednutí-rozlitím [mm] | N12 výchozí | N12b – snížení dávky urychlovače a vody |
|--------------------------|---------------------------------|--|
| t_0 | 790/780 790 -> SF3 | 790/750 770 -> SF3 |

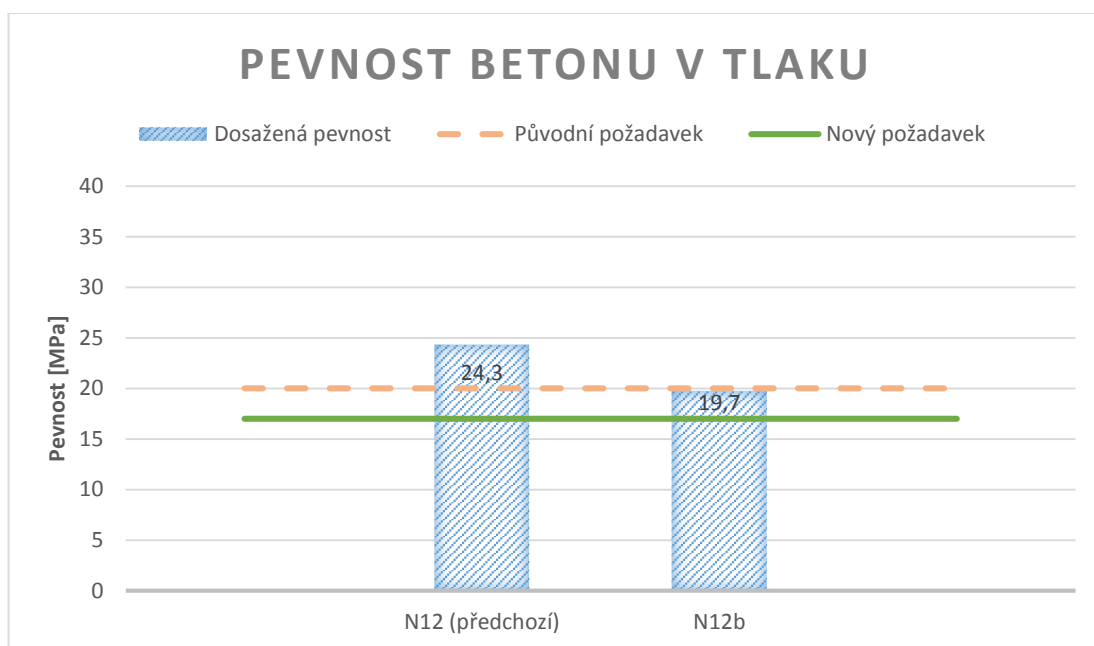
Zkušební krychle tedy byly nejprve podrobeny zkoušce pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách.



Obr. 61 – Povrch zkušebních krychlí N12b

Tab. 42 - Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N12b vyrobené v t_{90})

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|---------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 7 | 150 | 149 | 149 | 7620 | 2287 | 469,42 | 21,0 |
| 8 | 150 | 149 | 151 | 7695 | 2279 | 436,00 | 19,5 |
| 9 | 149 | 149 | 151 | 7660 | 2291 | 415,66 | 18,7 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 19,7 |
| sm. odchylka | | | | | | | 1,0 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 1,2 |



Obr. 62 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N12, N12b

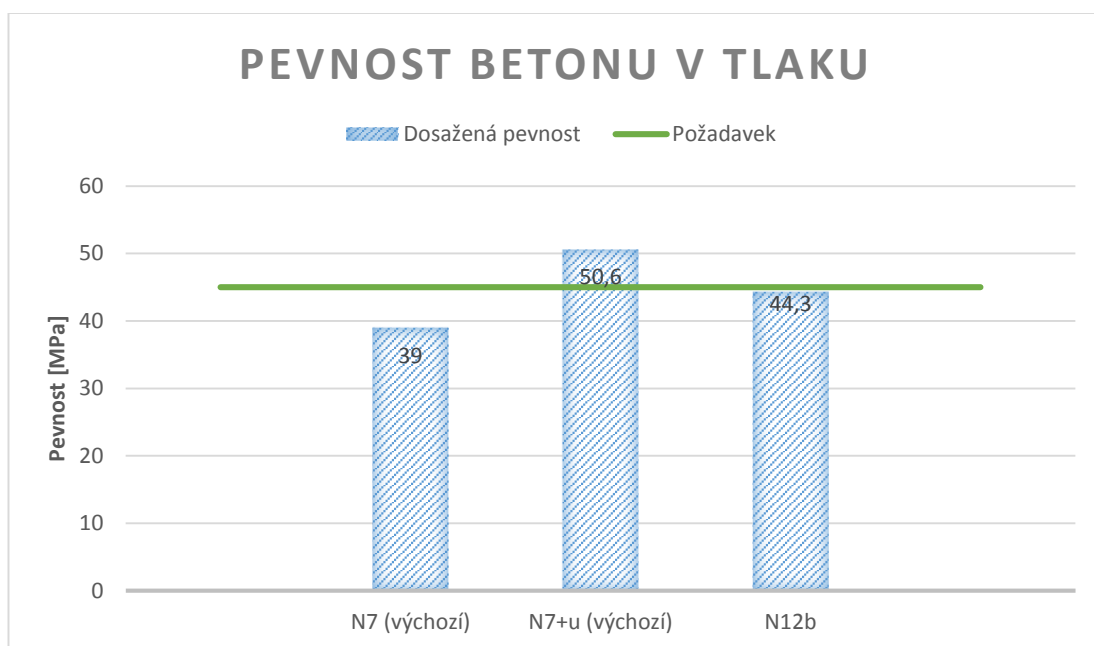
Jak se očekávalo, snížením dávky urychlovače došlo k poklesu jednodenní pevnosti vůči výchozí receptuře N12. Snížením dávky o 0,5 % (z 2,5 % na 2 %) došlo k poklesu pevnosti o necelých 20 %.

Dalším krokem bylo stanovení charakteristické pevnosti betonu v tlaku na krychlích po 28 dnech.

Tab. 43 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech (N12b vyrobené v t_{90})

| Vzorek č. | Rozměry vzorku | | | Hmotnost vzorku [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální síla [kN] | Pevnost v tlaku [MPa] |
|-------------------------|----------------|-------|-------|---------------------|--|---------------------|-----------------------|
| | šířka | výška | délka | | | | |
| | [mm] | | | | | | |
| 1 | 149 | 152 | 149 | 7675 | 2280 | 988,92 | 43,8 |
| 2 | 149 | 151 | 149 | 7730 | 2297 | 992,55 | 44,0 |
| 3 | 149 | 152 | 149 | 7720 | 2282 | 1024,31 | 45,2 |
| průměrná hodnota | | | | | | | 44,3 |
| sm. odchylka | | | | | | | 0,6 |
| výb. sm. odchylka | | | | | | | 0,8 |

Byla vypočtena charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku $f_{c,k} = 41,8$ MPa, což ale nespĺnilo minimální doporučenou pevnostní třídu betonu C 35/45. Nicméně, to už napověděla průměrná hodnota pevnosti.



Obr. 63 - Grafické srovnání průměrných pevností betonu v tlaku po 28 dnech receptur N7, N7+u, N12b

Výsledky zkoušek naznačily, že nejspíše vyšší dávka urychlovače způsobila rychlejší nárůst krátkodobé pevnosti, ale zároveň neměla takový vliv na dlouhodobou pevnost jako nižší dávka (N7+u). Avšak hodnota pevnosti po 28 dnech byla stále vyšší než u výchozí receptury bez urychlovače (N7).

Jako poslední zkouška byla provedena odolnost betonu vůči průsaku tlakovou vodou. Průměrná hodnota průsaku tlakovou vodou 35 mm splnila požadavek 35 mm.



Obr. 64 – Krychle N12b upnuté do zkušebního zařízení v průběhu zkoušky

Tab. 44 – Vyhodnocení průměrné hodnoty průsaku

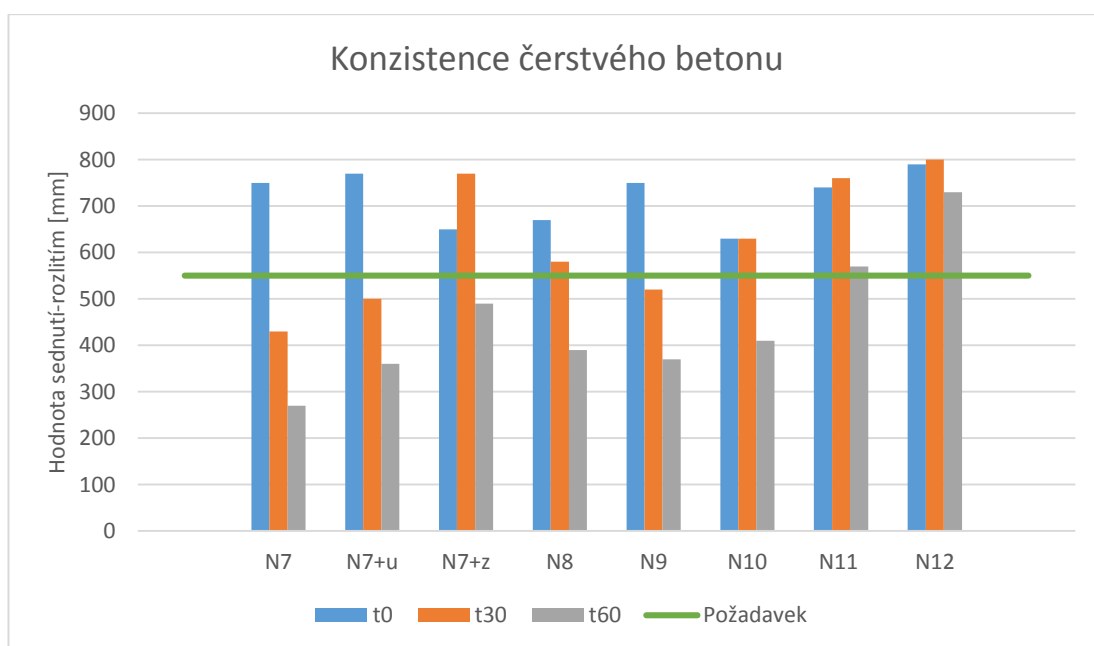
| Vzorek | Průsak [mm] |
|-------------------------|----------------|
| 4 | 48 |
| 5 | 30 |
| 6 | 27 |
| Průměrná hodnota | 35 |

Dalším krokem při úpravě složení by mělo být mírné snížení dávky urychlovače s ohledem na rezervu v jednodenní pevnosti, což by mělo vést zároveň ke zvýšení pevnosti po 28 dnech, která byla mírně pod požadovanou hodnotou charakteristické pevnosti v tlaku. Zároveň by bylo možné s ohledem na dostatečnou zpracovatelnost čerstvého betonu přistoupit ke snížení množství záměsové vody, případně snížení dávky superplastifikátoru.

6. Zhodnocení výsledků

Na počátku zkoušení byly první receptury navrženy s ohledem na normou doporučené složení. Následně byly receptury upraveny podle výsledků zkoušek jednodenní pevnosti betonu v tlaku. Zároveň byla pouze vizuálně hodnocena zpracovatelnost čerstvého betonu. Po nalezení přibližného složení betonu, který se blížil požadovaným vlastnostem, už byl tedy čerstvý beton vybraných receptur navíc podroben zkoušce zpracovatelnosti sednutí-rozlitím kužele v intervalech 0, 30 a 60 minut od zamíchání směsi.

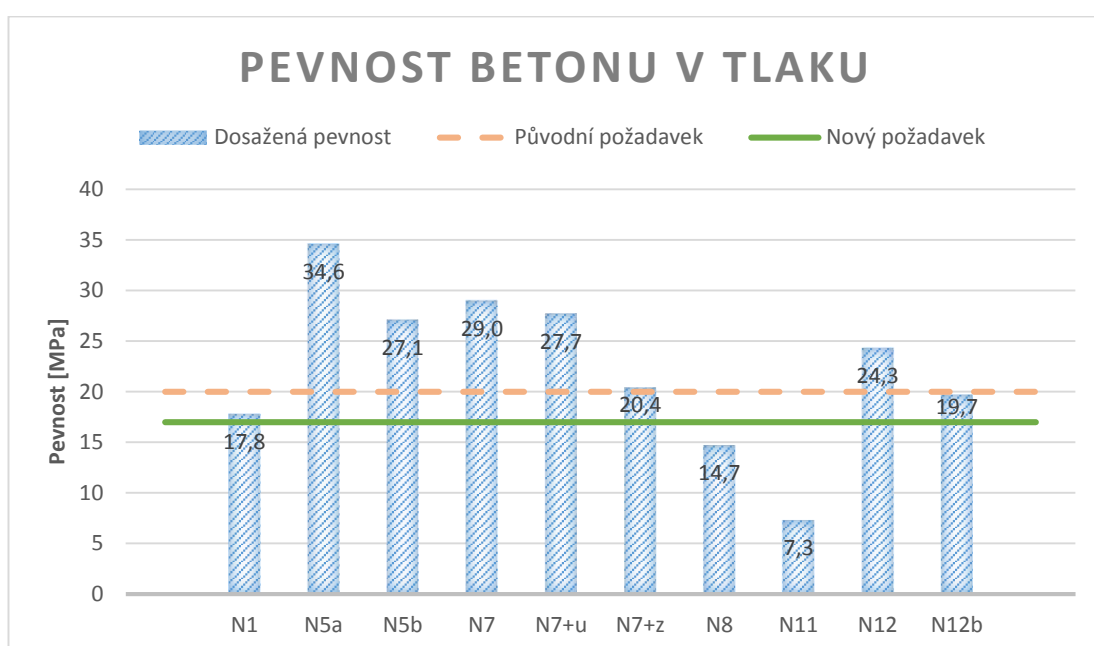
V následujících grafech jsou porovnány vybrané receptury, u kterých došlo k výraznější změně vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu.



Obr. 65 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu vybraných receptur

Jak je vidět z Obr. 65 ve všech případech byla dosažena požadovaná konzistence pro samozhutnitelný beton v čase t_0 , ale už jen u některých v čase t_{30} . Požadované konzistence pro čerstvý beton v čase t_{60} bylo dosaženo pouze v posledních dvou případech. První výraznější rozdíl v době zpracovatelnosti byl patrný po přidání zpomalovače (N7+z). Následujícím pokusem zvýšit dávku zpomalovače nad doporučenou hodnotu výrobce (N8), nedošlo k udržení požadované konzistence, ale

naopak došlo k jejímu zhoršení. Stejně tak tomu bylo i při zvýšení dávky superplastifikátoru nad doporučenou hodnotu výrobce (N9), kde byl rozdíl ještě výraznější. Dalším neúspěšným pokusem byla změna superplastifikátoru (N10), kdy došlo ke zhoršení tekutosti čerstvého betonu. Zásadní rozdíl nastal při další změně superplastifikátoru (N11), kdy došlo k požadovanému prodloužení doby zpracovatelnosti čerstvého betonu. Mírným snížením množství filleru (N12), který svým měrným povrchem zvyšuje potřebu záměsové vody pro zachování dané konzistence, došlo pouze k nepatrnému zvýšení tekutosti.



Obr. 66 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku vybraných receptur

První podstatnou změnou viditelnou z Obr. 66 byl významný nárůst pevnosti způsobený zvýšením množství cementu. Zároveň byl vidět značný vliv vibrace vzorku při ukládání do formy, kdy pro stejný vzorek betonu byl rozdíl průměrných pevností s vibrací (N5a) a bez vibrace (N5b) 7,5 MPa. Další rozdíl byl patrný u receptury N7 po přidání zpomalovače (N7+z), kdy došlo k výraznému poklesu jednodenní pevnosti. Naopak po přidání urychlovače (N7+u) nedošlo k požadovanému nárůstu pevnosti, což bylo způsobeno nejspíše nižší dávkou, než doporučuje výrobce. Zásadní rozdíl nastal při použití nového superplastifikátoru v kombinaci se zpomalovačem a provzdušňovačem (N11), kdy došlo k velmi výraznému poklesu jednodenní pevnosti. Z toho důvodu bylo vyloučeno další použití zpomalovače a pro dosažení stanovené

jednodenní pevnosti bylo přistoupeno k aplikaci urychlovače. Na rozdíl od výchozí receptury (*N7+u*) už bylo v tomto případě dodrženo výrobcem doporučené rozmezí a byla použita vyšší dávka urychlovače, ale i přesto byla pevnost nižší a to z důvodu značného vlivu superplastifikátoru na pokles jednodenní pevnosti. Posledním krokem bylo snížení dávky urychlovače (*N12b*), kdy došlo k poklesu jednodenní pevnosti o necelých 20 % snížením dávky o 0,5 % (z 2,5 % na 2 % hmotnosti cementu).

Během zkoušení se jednoznačně potvrdilo, jak je velmi důležité vyzkoušet konkrétní chemické přísady pro dané složení betonu, zejména jsou-li používány v kombinaci. Z provedených zkoušek byly patrné dva faktory, které měly podstatný vliv na výsledky. Prvním faktorem bylo použití různých superplastifikátorů na stejné bázi polykarboxylátů, které měly odlišné chování v čase pro stejné receptury. Druhým faktorem bylo dodržení doporučeného rozmezí minimální a maximální dávky přísady dané výrobcem.

7. Závěr

Cílem diplomové práce byla analýza vlivu vybraných přísad na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Dále pak návrh vhodné receptury betonu s využitím chemických přísad a minerální příměsi v podobě kamenné moučky podle předem daných požadavků od zadavatele úkolu, kterým byla stavební firma db Betonové jímky s.r.o., zabývající se výrobou a realizací zejména betonových jímek a podobných konstrukcí pro nakládání s odpadními a dešťovými vodami.

V teoretické části byly popsány jednotlivé druhy přísad, jejich vliv na čerstvý a ztvrdlý beton, normové požadavky a používané chemické látky. Dále byly stručně charakterizovány minerální příměsi do betonu z důvodu požadovaného použití kamenné moučky.

V experimentální části byl pozorován vliv jednotlivých přísad na vlastnosti betonu, jako je doba zpracovatelnosti čerstvého betonu a rychlost nárůstu tlakové pevnosti ztvrdlého betonu. Součástí práce byly také doprovodné zkoušky ztvrdlého betonu, a to odolnost betonu vůči průsaku tlakové vody a CHRL. Receptura betonu byla navržena s ohledem na stupně vlivu prostředí a na další konkrétní požadavky, což byla doba zpracovatelnosti a pevnost betonu v tlaku po 24 hodinách.

Dalším krokem při úpravě složení by mělo být mírné snížení dávky urychlovače s ohledem na rezervu v jednodenní pevnosti, což by mělo vést zároveň ke zvýšení pevnosti po 28 dnech, která byla mírně pod požadovanou hodnotou charakteristické pevnosti v tlaku. Zároveň by bylo možné s ohledem na dostatečnou zpracovatelnost čerstvého betonu přistoupit ke snížení množství záměsové vody, případně snížení dávky superplastifikátoru.

Složení betonu nebylo s ohledem na povinnost zveřejnit diplomovou práci možné zcela konkretizovat a jako výsledná receptura byla navržena tedy receptura N12b a měla následující složení.

Tab. 45 – Výsledné složení receptury

| Složka | Množství [kg/m ³] |
|---|-------------------------------|
| <p>Recepturu není možné zveřejnit, jde o vlastnictví firmy, která projekt finančně podpořila. Plná verze práce je k dispozici v knihovně katedry betonových a zděných konstrukcí.</p> | |

Návrh a zkoušení betonu probíhalo v laboratorních podmínkách a proto by dalším krokem měla být výroba a zkoušení betonu podle navržené receptury v průmyslové výrobě, která postihne reálné podmínky zadavatele.

Literatura

- [1] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. *Betonové stavitelství*. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] DE SCHUTTER, Geert. *Samozhutnitelný beton*. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [4] ZAJÍČEK, Milan. *CHEMICKÉ PŘÍSLADY DO BETONU A MALT* [online]. In: 2008 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/cihly-tvarnice/chemicke-prisady-do-betonu-amalt>
- [5] TRTÍK, Karel. *Technologie betonu*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04408-7.
- [6] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [7] MARGOLDOVÁ, Jana. *BEREVNÝ, NE JEN ŠEDÝ BETON* [online]. In: 1/2010 [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2010-01.pdf
- [8] *SLOŽENÍ BETONU – SLOŽKY BETONU* [online]. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu>
- [9] *STAVEBNÍ HMOTY – KONSTRUKČNÍ VLASTNOSTI BETONU* [online]. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ1/vyuka/hmoty/vlastnosti.html>

Normy

- [n1] ČSN EN 934-2 (722326). *Příslady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Definice, požadavky, shoda, značení a označování štítky*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [n2] ČSN EN 206 (732403). *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [n3] ČSN P 73 2404 (732404). *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplňující informace*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [n4] ČSN EN 12350-8 (731301). *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [n5] ČSN EN 12350-7 (731301). *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [n6] ČSN EN 12390-3 (731302). *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [n7] ČSN EN 12390-8 (731302). *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [n8] ČSN 73 1326 (731326). *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Český normalizační institut, 1985.
- [n9] ČSN EN 12350-2 (731301). *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Český normalizační institut, 2009.

[n10] ČSN EN 12350-5 (731301). Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitem. Praha: Český normalizační institut, 2009.

Stránky výrobců přísad

[v1] PŘÍSADY DO BETONU STACHEMA [online]. [cit. 2016-12]. Dostupné z: <http://prisadydobetonu.stachema.cz/>

[v2] PŘÍSADY DO BETONU BETOSAN [online]. [cit. 2016-12]. Dostupné z: <http://www.betosan.cz/vyrobní-program/prisady-do-betonu-nahrada-betonu/>

[v3] TRANSPORTBETON [online]. [cit. 2016-12]. Dostupné z: http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/stavebnictvi/02a001/02a001sa01.html

[v4] PŘÍSADY DO BETONU MAPEI [online]. [cit. 2016-12]. Dostupné z: <http://www.mapei.com/CZ-CS/Prisady-do-betonu>

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 - Hmotnostní podíl složek betonu [8] | 8 |
| Obr. 2 - Vliv urychlovače tuhnutí (s) a tvrdnutí (h) ve srovnání s referenčním betonem bez přísad (c) na stupeň hydratace (a) a pevnost betonu v tlaku (f) [2] | 12 |
| Obr. 3 - Vliv jednotlivých druhů plastifikátorů na pevnost v tlaku pro beton se stejným vodním součinitelem [2] | 16 |
| Obr. 4 - Vliv jednotlivých druhů plastifikátorů na pevnost v tlaku pro beton se stejnou zpracovatelností [2] | 16 |
| Obr. 5 - Schéma vlivu superplastifikátorů na čerstvý a ztvrdlý beton [2] | 18 |
| Obr. 6 - Schématické znázornění rozdílného působení plastifikátoru vyvolávající elektrostatické odpuzování (vlevo) a superplastifikátoru způsobujícího stericke odpuzování (vpravo) [2] | 19 |
| Obr. 7 - Vliv provzdušnění na tlakovou pevnost betonu v závislosti na vodním součiniteli [2] | 22 |
| Obr. 8 - Rozdíl chování vody na povrchu běžného betonu a betonu s hydrofobním povrchem [2] | 25 |
| Obr. 9 - Forma - Abramsův kužel [n9] | 37 |
| Obr. 10 - Podkladní deska [n4] | 37 |
| Obr. 11 - Měření sednutí-rozlitem [n10] | 37 |
| Obr. 12 - Schéma tlakoměrného přístroje [n5] | 38 |
| Obr. 13 - Schéma zkoušky v tlaku [9] | 40 |
| Obr. 14 - Vyhovující typy porušení [n6] | 40 |
| Obr. 15 - Nevyhovující typy porušení [n6] | 41 |
| Obr. 16 - Schéma zkušebního zařízení [n7] | 42 |
| Obr. 17 - Naměřená hloubka průsaku | 42 |
| Obr. 18 - MIROŠOV frakce 8/16 | 46 |
| Obr. 19 - MIROŠOV frakce 4/8 | 47 |
| Obr. 20 - LEDCE frakce 0/4 | 47 |
| Obr. 21 - Sada zkušebních sít | 48 |
| Obr. 22 - Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí | 49 |
| Obr. 23 - Ideální křivka zrnitosti | 50 |
| Obr. 24 - Kamenivo po přidání do vody a po 24 hodinách | 51 |
| Obr. 25 - Forma s čerstvým betonem | 53 |
| Obr. 26 - Zkušební krychle o hraně 100 mm, receptury N1, N2, N3 | 53 |
| Obr. 27 - Porušený vzorek při zkoušce v tlaku | 54 |
| Obr. 28 - Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N1, N2, N3 | 55 |
| Obr. 29 - Čerstvý beton ve formách | 57 |
| Obr. 30 - Zkušební krychle o hraně 100 mm, receptury N4, N5a, N5b | 57 |
| Obr. 31 - Porušený vzorek po zkoušce v tlaku | 57 |
| Obr. 32 - Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N4, N5a s vibrací, N5b bez vibrace | 59 |

| | |
|---|----|
| Obr. 33 – Zkouška sednutí-rozlítím | 61 |
| Obr. 34 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N7, v čase t_{30} , t_{60} , t_{90} | 61 |
| Obr. 35 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N7+urychlovač, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90} | 62 |
| Obr. 36 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N7+zpomalovač, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90} | 62 |
| Obr. 37 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím | 63 |
| Obr. 38 – Výroba zkušebních krychlí o hraně 150 mm..... | 64 |
| Obr. 39 – Rozdíl v kvalitě povrchů jednotlivých krychlí | 64 |
| Obr. 40 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7 s rozdílným časem výroby vzorků | 65 |
| Obr. 41 – Zkouška pevnosti betonu v tlaku, zkušební lis..... | 66 |
| Obr. 42 – Automatické programovatelné cyklovací zařízení pro zkoušení povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek..... | 67 |
| Obr. 43 – Porušený povrch krychlí vystavený zkoušení..... | 68 |
| Obr. 44 – Průběh zkoušky uvnitř zařízení..... | 68 |
| Obr. 45 – Krychle N7 upnuté do zkušebního zařízení v průběhu zkoušky..... | 69 |
| Obr. 46 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N9, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90} | 71 |
| Obr. 47 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N8, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90} | 71 |
| Obr. 48 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím | 72 |
| Obr. 49 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7+z, N8, N9..... | 73 |
| Obr. 50 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím | 75 |
| Obr. 51 – Tlakoměrný přístroj..... | 76 |
| Obr. 52 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N11, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90} | 77 |
| Obr. 53 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím | 78 |
| Obr. 54 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7+z, N11 | 79 |
| Obr. 55 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N7 a N7b v čase t_{30} | 80 |
| Obr. 56 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím | 81 |
| Obr. 57 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N12, v čase t_0 , t_{30} , t_{60} , t_{90} | 82 |
| Obr. 58 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu podle průměrné hodnoty sednutí-rozlítím | 83 |
| Obr. 59 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N7+u, N11, N12 | 84 |
| Obr. 60 – Zkouška sednutí-rozlítím, receptura N12b, v čase t_0 | 85 |
| Obr. 61 – Povrch zkušebních krychlí N12b | 86 |
| Obr. 62 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku receptur N12, N12b..... | 87 |
| Obr. 63 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech receptur N7, N7+u, N12b..... | 88 |
| Obr. 64 – Krychle N12b upnuté do zkušebního zařízení v průběhu zkoušky..... | 88 |
| Obr. 65 – Grafické porovnání konzistence čerstvého betonu vybraných receptur | 90 |
| Obr. 66 – Grafické srovnání pevnosti betonu v tlaku vybraných receptur | 91 |

Obrázky neoznačené zdrojem vlastní prací autora.

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 – Klasifikace konzistence podle hodnoty sednutí-rozlítím | 37 |
| Tab. 2 – Zatřídění povrchu | 44 |
| Tab. 3 – Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 8/16 | 46 |
| Tab. 4 – Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 4/8 | 47 |
| Tab. 5 – Naměřené hodnoty LEDCE frakce 0/4 | 47 |
| Tab. 6 – Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 8/16..... | 48 |
| Tab. 7 – Naměřené hodnoty MIROŠOV frakce 4/8 | 48 |
| Tab. 8 – Naměřené hodnoty LEDCE frakce 0/4..... | 49 |
| Tab. 9 – Naměřené hodnoty kameniva MIROŠOV frakce 8/16..... | 51 |
| Tab. 10 – Složení receptur N1, N2, N3 | 52 |
| Tab. 11 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N1)..... | 54 |
| Tab. 12 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N2)..... | 54 |
| Tab. 13 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N3)..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Tab. 14 – Složení receptur N4, N5..... | 56 |
| Tab. 15 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N4)..... | 58 |
| Tab. 16 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N5a s vibrací)..... | 58 |
| Tab. 17 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N5b bez vibrace)..... | 58 |
| Tab. 18 – Složení receptur N7, N7+u, N7+z..... | 60 |
| Tab. 19 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N7 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 63 |
| Tab. 20 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N7 vyrobené v t_0)..... | 65 |
| Tab. 21 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N7, N7+u, N7+z vyrobené v t_{90})..... | 65 |
| Tab. 22 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech (N7 vyrobené v t_0)..... | 66 |
| Tab. 23 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech (N7, N7+u, N7+z vyrobené v t_{90})..... | 67 |
| Tab. 24 – Vyhodnocení stupně porušení..... | 69 |
| Tab. 25 – Vyhodnocení průměrné hodnoty průsaku..... | 70 |
| Tab. 26 – Složení receptur N8, N9..... | 70 |
| Tab. 27 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N8, N9 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 72 |
| Tab. 28 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N8 vyrobené v t_{90})..... | 73 |
| Tab. 29 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N9 vyrobené v t_{90})..... | 73 |
| Tab. 30 – Složení receptury N10..... | 74 |
| Tab. 31 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N10 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 75 |
| Tab. 32 – Složení receptury N11..... | 76 |
| Tab. 33 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N11 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 77 |
| Tab. 34 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N11 vyrobené v t_{90})..... | 78 |
| Tab. 35 – Složení receptury N7b..... | 80 |
| Tab. 36 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu 7b podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 80 |
| Tab. 37 – Složení receptury N12..... | 82 |
| Tab. 38 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N12 podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 83 |
| Tab. 39 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N12 vyrobené v t_{90})..... | 84 |
| Tab. 40 – Složení receptury N12b..... | 85 |
| Tab. 41 – Klasifikace konzistence čerstvého betonu N12b podle průměrné hodnoty sednutí-rozlitím..... | 86 |
| Tab. 42 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 24 hodinách (N12b vyrobené v t_{90})..... | 86 |
| Tab. 43 – Naměřené hodnoty pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech (N12b vyrobené v t_{90})..... | 87 |
| Tab. 44 – Vyhodnocení průměrné hodnoty průsaku..... | 89 |
| Tab. 45 – Výsledné složení receptury..... | 94 |

Tabulky neoznačené zdrojem jsou vlastní prací autora.

Použité programy

Microsoft Office 2016 Word

Microsoft Office 2016 Excel