

**STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STAVEBNÍ JOSEFA GOČÁRA**

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Stavebnictví, architektura a design interiérů**

**Praha 2020**

**Košťálová Martina**

**Střední průmyslová škola stavební Josefa Gočára  
Družstevní ohoz 3, Praha 4**

# **Náhrada plastifikátorů kavitovanou vodou**

*Středoškolská odborná činnost*

Konzultant: Ing. Jindřich Vorel, Ph.D.      Autor: Košťálová Martina

## **Anotace**

Tato práce středoškolské odborné činnosti se zabývá výzkumem nových technologických postupů při přípravě materiálů na bázi betonu se zvýšenou schopností plastifikace směsi za použití kavitované vody a omezit používání plastifikátorů. Využití navrhovaných směsí se uplatní zejména při zhotovení výrobků z betonové směsi. Dosažené pevnosti vzorků budou korelovány se standardními materiály v návaznosti na použití vhodných plniv a pojiv eventuálně možností vzniku nových struktur v období tuhnutí a tvrdnutí pojivových systémů bez přídavku plastifikátorů. Zjištěné poznatky umožní navrhovat technologie přípravy směsí dostatečných mechanických pevností zejména v tlaku a s vyšší odolností proti působení atmosférických podmínek v našich zeměpisných polohách sníženému obsahu póru ve struktuře navrženého kompozitu.

## **Annotation**

This essay of Student's Professional Activities focuses on inventing new technological processes to prepare concrete based materials with an enhanced plasticisation ability of the mixture using oxidated water while cutting down on plasticizers. The usage of proposed mixtures is going to apply primarily in making products out of concrete mixture. Achieved sorption of the samples is going to be correlated to standard materials in order to use the correct filling and connecting materials with the ability to eventually create new structures while in the process of solidification and hardening, without adding plasticizers. Found information are going to allow us to develop technologies for mixture preparation with sufficient mechanical strength, especially under pressure with a higher resistance against atmospheric conditions in our geographic location at lowered pore count in the structure of proposed composite.

## **Klíčová slova**

beton, plastifikátor, pojivové systémy, kompozit, kavitovaná voda

## **Keywords**

concrete, plasticizer, binder systems, composite, oxidated water

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto předloženou práci do středoškolské odborné činnosti zpracovala samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Jindřicha Vorla, Ph.D.

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

V Praze dne 10. března 2020

Košťálová Martina

## **Poděkování**

Touto cestou bych ráda poděkovala řediteli SPŠ stavební Josefa Gočára Ing. Bc. Tomáši Langerovi za možnost provádět tuto práci v laboratořích školy, konzultantovi Ing. Jindřichu Vorlovi, Ph.D. za pomoc a užitečné rady a Ing. Davidu Kolouškovi, CSc. za technickou podporu při zjišťování mikrostrukturálního složení navrhovaných kompozitů.

# Obsah

Úvod.....	9
<b>1 Cíl práce .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Teoretická část.....</b>	<b>12</b>
2.1 Kavitace.....	12
2.2 Voda.....	12
2.3 Absorpce plynů ve vodě .....	15
2.4 Beton.....	16
2.5 Portlandský cement.....	17
2.6 Přísady.....	17
<b>3 Experimentální část.....</b>	<b>20</b>
3.1 Suroviny pro zkoušky .....	20
3.1.1 Plastifikátory pro zkoušky.....	20
3.1.1.1 Den Braven .....	20
3.1.1.2 MC-PowerFlow 2695.....	21
3.1.1.2 Murasan BWA 14 .....	21
3.1.1.3 Muraplast FK 43.....	22
3.1.2 Cementy pro zkoušky.....	22
3.1.1.1 Cement 32,5 R.....	23
3.1.1.2 Cement 42,5 R.....	23
3.1.1.3 Cement 52,5 R.....	24
3.1.3 Voda.....	24
3.2 Příprava zkušebních směsí .....	25
3.2.1 Zkoušky směsí cement – voda bez plastifikátoru .....	25
3.2.2 Zkoušky s cementem 32,5 R, vodou a vzorky plastifikátorů.....	27
3.2.2.1 Příprava tělísek s plastifikátorem Den Braven .....	27
3.2.2.2 Příprava tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695.....	28
3.2.2.3 Příprava tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14.....	29
3.2.2.4 Příprava tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 .....	32
3.2.2.5 Srovnání dosažených pevností s cementem 32,5 R a plastifikátory .....	33
3.2.3 Zkoušky s cementem 42,5 R, vodou a vzorky plastifikátorů.....	34
3.2.3.1 Příprava tělísek s plastifikátorem Den Braven .....	34
3.2.3.2 Příprava tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695.....	35
3.2.3.3 Příprava tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14.....	36
3.2.3.4 Příprava tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 .....	37
3.2.3.5 Srovnání dosažených pevností s cementem 42,5 R a plastifikátory .....	38
3.2.4 Zkoušky s cementem 52,5 R, vodou a vzorky plastifikátorů.....	39
3.2.4.1 Příprava tělísek s plastifikátorem Den Braven .....	40
3.2.4.2 Příprava tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695.....	40

3.2.4.3	Příprava tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14.....	41
3.2.4.4	Příprava tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 .....	42
3.2.4.5	Srovnání dosažených pevností s cementem 52,5 R a plastifikátory.....	43
3.2.5	Porovnání plastifikátorů s třídami cementů .....	45
3.2.5.1	Plastifikátor Den Braven.....	45
3.2.5.2	Plastifikátor MC-PowerFlow 2695.....	46
3.2.5.3	Plastifikátor Murasan BWA 14 .....	48
3.2.5.4	Plastifikátor Muraplast FK 43.....	49
3.2.5.5	Porovnání účinnosti plastifikátorů vzhledem ke třídě cementu .....	51
3.3	Zkoušky s kavitovanou vodou .....	53
3.3.1	Určení nejvyššího výkonu kavitačního přístroje .....	53
3.3.2	Zkoušky s cementem 32,5 R a kavitovanou vodou.....	55
3.3.2.1	Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli $w = 0,25$ .....	55
3.3.2.2	Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli $w = 0,3$ .....	57
3.3.2.3	Zkouška s kavitovanou demineralizovanou vodou .....	58
3.3.2.4	Porovnání tlakových pevností s kavitovanou vodou a CEM 32,5 R.....	59
3.3.3	Zkoušky s cementem 42,5 R a kavitovanou vodou.....	61
3.3.3.1	Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli $w = 0,25$ .....	61
3.3.3.2	Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,3 .....	62
3.3.3.3	Zkouška s kavitovanou demineralizovanou vodou .....	63
3.3.3.4	Porovnání tlakových pevností s kavitovanou vodou a CEM 42,5 R.....	64
3.3.4	Zkoušky s cementem 52,5 R a kavitovanou vodou.....	65
3.3.4.1	Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,29.....	65
3.3.4.2	Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,33.....	66
3.3.4.3	Zkouška s kavitovanou demineralizovanou vodou .....	67
3.3.4.4	Porovnání tlakových pevností s kavitovanou vodou a CEM 52,5 R.....	68
3.3.5	Srovnání tlakových pevností vzorků s kavitovanou vodou.....	69
3.3.5.1	Srovnání tlakových pevností vzorků s kavitovanou pitnou vodou; $w = 0,25$ (0,29) .....	70
3.3.5.2	Srovnání tlakových pevností vzorků s kavitovanou pitnou vodou; $w = 0,3$ (0,33) .....	71
3.3.5.3	Srovnání tlakových pevností s kavitovanou demineralizovanou vodou.....	72
3.3.6	Výroba betonových vzorků s kavitovanou vodou.....	73
3.3.7	Ztráta účinku kavitace v závislosti na čase .....	75
4	Vyhodnocení a návrhy využití kavitované vody.....	77
4.1	Návrhy a možnosti využití kavitované vody ve stavebnictví .....	77
4.1.1	Náhrada plastifikátorů .....	77
4.1.2	Zlepšení mrazuvzdornosti .....	80
4.1.3	Zlepšení zpracovatelnosti .....	80
4.1.4	Výroba keramických výrobků .....	80
4.2	Návrhy a možnosti využití kavitované vody v jiných oborech .....	80

4.2.1	Odstranění nečistot .....	80
4.2.2	Urychlení sedimentace .....	80
4.2.3	Využití k zálivce rostlin.....	81
4.3	Ekonomické vyhodnocení.....	82
Závěr.....		85
Seznam literatury .....		86
Seznam tabulek.....		87
Seznam grafů .....		87
Seznam obrázků .....		88
Seznam příloh .....		89



## Úvod

Výroba cementových betonů v technické praxi probíhá standardním způsobem, tedy se jedná hlavně o směs plniva (kameniva většinou anorganického původu dostatečné pevnosti), pojiva tedy cementu různých pevnostních tříd - 32,5; 42,5 a 52,5, což je odvislé od druhu betonové konstrukce tedy zejména stupně agresivity prostředí, pevnostní třídy a dalších technologických požadavků. Poslední velmi důležitou a nutnou složkou je voda, která v betonářské technologii umožňuje jednak hydrataci slínkových minerálů a tím dosažení požadované pevnosti, a zároveň musí zajistit reologické vlastnosti čerstvého betonu potřebné pro jeho zpracování. Čím méně reologické vody dodáme, tím můžeme u betonu dosáhnout větších pevností. Při sestavování receptur směsí je tedy mimořádně důležité stanovení optimální množství vody.

Cementy brání docílení tohoto ideálního stavu, protože se vyznačují množstvím nenasycených povrchových nábojů a svou výraznou tendencí k flokulaci, zejména když se dostanou do styku s polarizovanou kapalinou – vodou. V této struktuře je část vody zachycena uvnitř flokulí a tím není k dispozici na ztekutění směsi a dosažení vhodné konzistence.

Přídavek plastifikačních přísad upravuje povrchové napětí cementových zrn a přispívá tím tak ke zlepšení konzistence čerstvého betonu. [6; 7]

Aktuálním trendem je příprava vytvoření směsí s potřebným množstvím vody pro hydrataci cementu a výrazným omezením vody reologické, což je v současné době řešeno přídavkem plastifikátorů a super plastifikátorů různých druhů o různém složení účinných složek od různých výrobců. Z hlediska ekonomického a ekologického je trend použití upravenou záměsovou vodu tak, aby nahradila zmíněné plastifikátory se stejným účinkem a bylo možné vytvoření standardní betonové směsí stejných či lepších zejména mechanických vlastností. Jak vyplývá z použité literatury, nebyla zatím tato problematika řešena. Očekávám tedy, že má aplikace přinese pozitivní přínos a nové trendy pro přípravu směsí s dobrou zpracovatelností, stabilitou za různých klimatických podmínek, s dobrými mechanickými pevnostmi pro použití i v náročných konstrukcích. Předpokládám, že zkoušená metoda bude mít pozitivní přínos zejména v úspoře eventuálně vypuštění používaných plastifikátorů, objasní vzájemné působení jednotlivých složek použitých pro výrobu betonu a též fyzikálně chemické působení v navrhovaných směsích s postupným uplatněním při výrobě čerstvého betonu.

V tomto příspěvku je též prezentována řada předběžných výsledků, které jsou součástí mého projektu na zjištění, a porovnání určitých mnou navržených a připravených nových směsí za

použití různých cementů s různými pevnostními třídami tak i různých druhů používaných plastifikátorů v návaznosti na mechanicky upravenou vodu. Postupy přípravy a formování směsí jsou popsány v této práci se snahou o docílení maximálního využití navrhovaných směsí za dosažení jejich dobrých mechanických vlastností a odolnosti za různých klimatických podmínek. Získané zkušenosti se mohou stát podmětem pro další rozvoj aplikací podobných typů. [1]

# 1 Cíl práce

Cílem mé práce je vyřešit omezení používání plastifikačních přísad, které jsou dnes součástí většiny betonových směsí při přípravě čerstvého betonu s tím, že budou zachovány stejné vlastnosti nebo dojde ke zlepšení vlastností těchto směsí potažmo i výrobků z nich následně vytvořených. Jedná se tedy zejména o dosažení vyšších konečných tlakových pevností a zvýšení odolnosti kompozitů proti atmosférickým podmínkám, kterým budou výrobky během své životnosti každodenně vystaveny. Smyslem této práce je zdůraznit hlavní výhody a nevýhody použití standardních postupů v návaznosti na použité složky do připravovaných směsí, jejich kombinace s ohledem na požadované fyzikálně mechanické vlastnosti.

Kromě pevnostních charakteristik je cílem této práce studovat pomocí moderní instrumentální techniky chemické a fázové složení těchto kompozitů jak ve formě amorfní, tak i krystalické. Tento výzkum dává možnost soustředit se na výběr takových materiálů a technologií, kdy výsledkem syntézy bude kompozit o mikro (nano) struktuře a vlastnostech splňujících požadavky architekta, stability a environmentálního využití na vybraných místech města či budovy.

Při přípravě vzorků se jedná zejména o zaměření na složení a přípravu základních směsí, dále vliv plastifikátorů a kavitované vody na strukturu zatvrdlých materiálů a užité vlastnosti betonových výrobků. Ze zjištěných poznatků je možno navrhnout a připravit směsi za použití takové vhodné kombinace surovin, aby cíleným zaměřením bylo dosaženo požadovaného efektu s využitím vhodných surovin a byly získány vlastnosti dle praktických potřeb uživatele.

## 2 Teoretická část

Při výrobě betonových výrobků se v dnešní době využívá celá řada různých nových poznatků vědy a techniky. Jednou velmi frekventovanou a již se dá říct zdomácnělou přísadou do betonových směsí je použití plastifikátorů, které, jak je známo, umožňují snížit množství záměsové vody, a tudíž možnost snížení množství pojiva – cementu do záměsí za dosažení stejných pevnostních charakteristik zatvrdlého betonu. Touto prací se snažím odzkoušet podíly různých druhů používaných plastifikátorů na pevnosti v tlaku, ale hlavně vyřešit jejich adekvátní náhradu, která bude vykazovat nižší zatížení environmentální a zejména i finanční.

### 2.1 Kavitace

Kavitace je uvolňování vzduchu pohlceného ve vodě. Pohlcené množství je tím větší, čím je větší tlak vzduchu nad vodou a čím nižší je teplota vody. Sníží-li se tudíž tlak, pohlcený vzduch z vody se částečně uvolňuje v bublinkách – voda šumí. Čím větší je snížení tlaku, tím větší je uvolněné množství. Atmosférický vzduch, pohlcený ve vodě, se v bublinkách z vody uvolňuje, nastává provzdušnění vody. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitace). Poněvadž vzdušný kyslík se pohlcuje vodou ve větší míře než dusík, je pohlcený vzduch bohatší kyslíkem než atmosférický. Jeho složení jest asi 0,35 O + 0,65 N. Uvolněný vzduch způsobuje tudíž silnou korozi kovů. Kavítace se projevuje v největší míře v místech nejnižších tlaků. [5]

### 2.2 Voda

Voda, ač sama o sobě není stavební látkou, má významnou úlohu v mnoha procesech ve stavebnictví, např.:

- při výrobě a zpracování stavebních látek
- voda působící na zabudované stavební látky, a tím na stavební díla

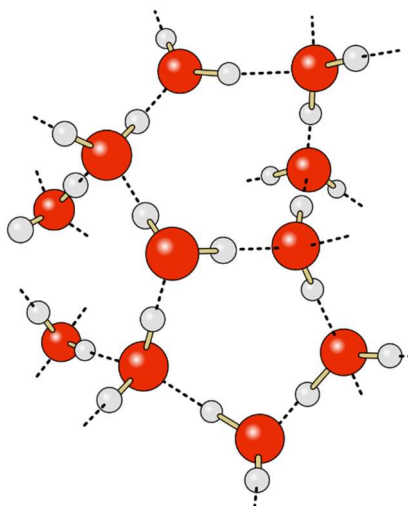
Molekula vody se především vyznačuje svou nesouměrnou stavbou. Skládá se z atomu kyslíku a dvou atomů vodíku. Molekula vody obsahuje kromě vazebné dvojice elektronů mezi O a H ještě dva volné elektronové páry. Negativní náboje těchto elektronových párů mohou pozitivně nabitě částice přitahovat i vázat. I z protonů vycházejí pozitivní přitažlivé síly, které mohou negativní náboje, jako např. volný elektronový pár, přitahovat.

Z tohoto uspořádání vyplývá, že tetraedrická stavba molekuly vody má asymetrické rozdělení nábojů a má značný dipólový moment. Vazba O-H je silně polární. Kvantitativně ji vyjadřuje její permitivita  $\epsilon = 78,54 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  při 25 °C.

Pro geometrii molekuly vody jsou charakteristické:

- vzdálenost O-H (96 pm)
- poloměr molekuly (138 pm)
- úhel H-O-H ( $105^\circ$ )
- úhel mezi volnými elektronovými páry a jádrem kyslíku ( $120^\circ$ )

Polární struktura vody má vliv na mnohé vlastnosti vody. Propůjčuje vodě velmi dobré rozpouštěcí vlastnosti zejména solí a sloučenin s polárními molekulami. Umožňuje především hydrataci maltovin a jiné důležité procesy ve stavebnictví. Vlivem své polaridy se mohou molekuly vody vázat, asociovat neboli sdružovat v jakési komplexy. V tuhém stavu je každý atom O tetraedricky obklopen čtyřmi atomy H, z nichž dva jsou vázány atomově a dva jsou vázány vodíkovými můstky (viz obr. č. 1).

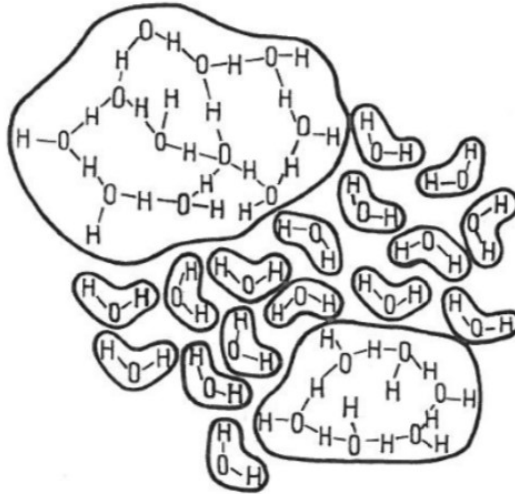


Obr. 1: Vodíkové můstky

Zdroj: [9]

Při tání se tato struktura rozpadá, avšak přesto zůstává i v kapalném stavu jakési proměnlivé uspořádání molekul.

Při ochlazování vodní páry pod  $100^\circ\text{C}$  (kondenzace) se vytvářejí jednoduché a vícenásobné asociáty molekul – až  $(\text{H}_2\text{O})_6$ . Tato asociace s poklesem teploty rychle roste, takže při  $70^\circ\text{C}$  se vytvářejí sítě z asi 25 molekul, při  $25^\circ\text{C}$  z 90 molekul a při  $0^\circ\text{C}$  ze 100 molekul. Strukturální model této vody je na obr. č. 2.



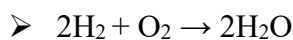
Obr. 2: Model jednotlivých a asociovaných molekul vody

Zdroj: [6]

Značná asociace molekul vody způsobuje vysoký bod varu vody. Bez asociace by byl mnohem nižší. Kdyby voda neměla polární charakter, byl by její bod varu asi při  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Vodu lze získat buď sloučením vodíku a kyslíku (třaskavý plyn), nebo z iontů  $\text{H}^+$  a  $\text{OH}^-$ .

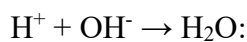
Vznik kapalně vody z prvků:



$$\Delta H = -572,8 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

V tomto případě se uvolní značné množství tepla.

➤ Vznik vody z iontů:



$$\Delta H = -57,15 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Země je vodou pokryta ze 70,6 % ( $360 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ ) a její váha se odhaduje na  $1,6 \cdot 10^{21} \text{ kg}$ . Kromě volné vody obsahuje zemská kůra též vodu vázanou (např. v sádrovci 21 %, v kaolinitu 13,9 % apod.). Přírodní voda není nikdy čistá, čistá je pouze voda destilovaná. Dešťová voda obsahuje absorbovaný vzduch a prach, v průmyslových oblastech navíc další rozpustné látky, takže reaguje kyselě ( $\text{pH} < 5$ ).

Nejdůležitější součásti rozpuštěné v pramenité, studniční a spodní vodě jsou kromě  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$  některé soli jako  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  apod. Větší množství nejrůznějších solí obsahuje minerální vody. Rovněž mořská voda je bohatá na různé soli. [6; 7]

## Funkce vody

Voda v betonářské technologii umožňuje jednak hydrataci slínkových minerálů, a tím dosažení požadované pevnosti a zároveň musí zajistit reologické vlastnosti čerstvého betonu, potřebné pro jeho zpracování. Čím méně vody dodáme, tím můžeme u betonu dosáhnout vyšších pevností. Při sestavování receptur je tedy mimořádně důležité stanovit optimální množství vody.

Cementy brání docílení tohoto ideálního stavu, protože se vyznačují množstvím nenasyčených povrchových nábojů a mají výraznou tendenci k flokulaci, zejména když se dostanou do styku s polarizovanou kapalinou – vodou. V této struktuře je část vody zachycena uvnitř flokulí a tím není k dispozici na ztekucení směsi a dosažení vhodné konzistence.

Přídavek plastifikačních přísad upravuje povrchové napětí cementových zrn a přispívá ke zlepšení konzistence čerstvého betonu. [6; 7]

## 2.3 Absorpce plynů ve vodě

Plyn stýkající se s kapalinou vniká do kapaliny a rozpouští se v ní, až konečně nastane rovnovážný stav, v němž je roztok nasycen. Dosažení nasycenosti se urychlí protřepáním. Rozpustnost plynů v kapalinách závisí netoliko na jakosti plynu a kapaliny a na teplotě (jako je tomu u roztoků látek pevných), nýbrž i na tlaku plynu nad kapalinou. Rovnováhu mezi nasyceným roztokem a plynem si představujeme podle kinetické teorie plynů dynamicky, tj. tak, že v určité době právě tolik molekul plynu unikne, kolik se jich nově pohltí. Když se zvýší tlak v plynu nad roztokem, zvětší se v témže poměru počet molekul do kapaliny nově vstupujících; má-li to být kompenzováno zvětšeným počtem molekul z roztoku unikajících, musí se za nové rovnováhy zvětšit ve stejném poměru počet pohlcených molekul. Podle toho množství plynu kapalinou za nasycenosti pohlceného je úměrné tlaku plynu nad kapalinou.

To znamená, že užitý objem  $V$  kapaliny pohlcuje za různých tlaků vždy též objem  $v$  plynu, měření při tlaku a teplotě plynu nad kapalinou. Stálý poměr těchto objemů je  $\frac{v}{V} = a'$ . Robert Wilhelm Bunsen zavedl jakožto absorpční koeficient  $a$  poměr objemu  $v_0$  pohlceného kapalinou, měřeného při tlaku plynu nad roztokem, avšak při teplotě  $0^\circ$ , k objemu  $V$  kapaliny. Vztah mezi absorpčním koeficientem  $a$  a rozpustností  $a'$  je tudíž:

$$a = \frac{v_0}{V} = \frac{v}{(1 + \gamma t)V} = \frac{a'}{1 + \gamma t'}$$

Znamená-li  $\gamma = 0,00366$  koeficient roztažnosti nebo rozpínavosti plynů.

S rostoucí teplotou absorpční koeficient se zmenšuje zpravidla velmi značně; výjimku činí helium a neon, jejichž absorpční koeficient ve vodě s teplotou roste. Závislost absorpčního koeficientu vody na teplotě ukazuje tabulka č. 1:

Tabulka 1: Závislost absorpčního koeficientu vody na teplotě

Plyn [°C]	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>
0	0,0215	0,0231	0,0489	1,713	79,8	1175
10	0,0196	0,0183	0,0380	1,194	56,6	840
20	0,0182	0,0152	0,0310	0,878	39,4	683
30	0,0170	0,0132	0,0262	0,665	27,2	-
40	0,0164	0,0116	0,0231	0,530	18,8	-

Zdroj: [5]

Velký absorpční koeficient oxidu siřičitého a zejména amoniaku naznačuje, že vedle vlastní absorpce spolupůsobí také chemické vlivy. Je-li nad kapalinou směs plynů, je každý z nich absorbován tak, jako by ostatních plynů nebylo, tedy úměrně svému parciálnímu tlaku. Má proto pohlcená směs plynová jiné procentové složení než směs nad roztokem.

Např. absorpční koeficient kyslíku je více než dvakrát větší pro dusík; vzduch pohlcený vodou je proto bohatší na kyslík než vzduch volný. Vodní roztoky pevných látek jakož i vzájemné roztoky pohlcují méně plynů než čistá voda. Absorpční koeficient roztoků se zmenšuje s koncentrací roztoků.

Kapalina absorbující plyn vždy zvětšuje svůj objem; specifická hmota vzniklého roztoku je však někdy větší, někdy menší než čistého rozpouštědla. Při absorpci plynů vyvíjí se vždy teplo, a to mnohdy více, než kolik činí skupenské teplo, jež by vzniklo přímým zkapalněním pohlceného plynu; v těchto případech spolupůsobí vedle vlastní absorpce též chemická reakce mezi plynem a kapalinou.

Absorbované plyny vystupují z kapaliny, sníží-li se tlak nerozpuštěného plynu nad kapalinou, zvýší-li se teplota (varem se zpravidla vypudí všechny pohlcené plyny) anebo při ztuhnutí kapaliny. [5]

## 2.4 Beton

Beton je kompozitní látka, která vzniká ztvrdnutím směsi jeho základních složek, a to cementu jako nejčastěji používaného pojiva, kameniva (písku, šterku, drtě) jako plniva a vody. Je to druh staviva, které lze definovat jako umělý kámen vzhledově podobný přírodnímu slepenci. Příkladem jiných typů pojiv je např. geopolymerní pojivo (geopolymerní betony)



hořečnatá maltovina (Sorelův cement), asfalt (asfaltobeton), polymery (polymerbeton) nebo síra (sírobeton).

Vlastnosti betonu jsou především ovlivňovány skladbou a poměrem mísení jeho základních složek. Zvláštních vlastností betonu lze dosáhnout přidáním vhodných přísad a příměsí za účelem pozitivního ovlivnění jeho počátečních vlastností (zpracovatelnosti a času tuhnutí) a také konečných vlastností (pevnost, modul pružnosti, odolnost a trvanlivost).

Sekundárně ovlivňují vlastnosti betonu účinky okolního prostředí (např. vlhkost, teplota, agresivní činitelé). Proto jsou některé vlastnosti ztvrdlého betonu v průběhu času částečně proměnné.

Pro beton je charakteristická velmi dobrá pevnost v tlaku, ale současně i lomová křehkost. Jeho pevnost v tahu je minimální oproti jeho pevnosti v tlaku. Proto se beton vyztužuje např. ocelovými pruty, nebo rozptýlenými vlákny.

Aby beton skutečně splňoval požadavky na něj kladené, musí být vyráběn v dobré a stále stejné jakosti. Toto je primárně zabezpečeno řadou normativních a doporučujících požadavků na výrobu a kontrolu betonu. [2; 3; 8]

## 2.5 Portlandský cement

Portlandský cement je nejvíce používaným druhem cementu při výrobě malty a betonu. Obsahuje směs oxidů kovů a alkalických zemin vápníku, oxidy křemíku a hliníku. Portlandský cement je vyráběn pálením vápence (zdroj vápníku) s jílem a pískem (zdroj křemíku), čímž vzniká slínek, ke kterému se během procesu mletí přidává sádrovec jako regulátor tuhnutí.

Po interakci cementu s vodou nastává jeho hydratace, projevující se tuhnutím a tvrdnutím cementové pasty. Studium těchto procesů je velmi obtížné, neboť vznikají fáze, které se často vyznačují rentgenamorfni povahou, takže je není možno přesně stanovit (tedy blíže identifikovat). Pouze některé složky cementu jako například portlandit  $\text{Ca(OH)}_2$ , ettringit  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  a další fáze se vyznačují krystalickými útvary, i když do jisté míry mohou vykazovat amorfni charakter. Mezi novotvary vzniklé hydratací cementu, které jsou v převážné míře amorfni, zařazujeme vápenaté hydrosilikáty. [3; 4; 8]

## 2.6 Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během míchání do betonu v množství do 5 % hmotnosti cementu za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Přísady především působí na cementovou suspenzi a jejich působení je závislé na druhu

cementu. Vyšší měrný povrch cementu vytváří větší reakční plochu, a tím usnadňuje chemickou a případně fyzikálně-chemickou reakci. Naproti tomu však zrna cementu snadněji agregují, flokulují. Na účinnost přísad má vliv mineralogické složení, zejména obsah  $C_3A$ ,  $CaSO_4$  (ovlivňuje rozpustnost slínekových materiálů a tvorbu bisulfátu v počátečním stadiu tuhnutí cementu) a minerálů strusky, popílku a pucolánu.

Při používání přísad nesmí být dle požadavku ČSN EN 206-1 překročeny maximální dávky doporučené jejich výrobcem a při dávkování přísady nad  $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  cementu musí být prokázáno, že nepříznivě neovlivňuje vlastnosti a trvanlivost betonu. Přísada v dávkování menší než  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  cementu musí být vždy rozptýlena v části záměsové vody.

Rozpouštění minerálů v cementu je charakterizováno procesem difuze a chemické rovnováhy reagujících látek. Rozpustností rozumíme maximální možnou koncentraci, která odpovídá nasycení roztoku v poměru k cementu. [2; 3]

### **Plastifikační přísady**

Jsou chemické sloučeniny, jejichž úkolem je redukování množství záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti, nebo při zachování vodního součinitele zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu. Patří mezi nejdéle a nejčastěji používané přísady.

Základem plastifikačního efektu plastifikátorů je jejich povrchová aktivita. Plastifikátory jsou z velké části tvořené molekulami s relativně dlouhými řetězci zakončenými silně polární skupinou. Ve vodném roztoku se chovají jako tenzidy a absorbují se na povrchu cementových zrn tak, že jejich polární zakončení převládají na vnějším povrchu plastifikátorem „upraveného“ zrna. Stykem s okolními molekulami vody dochází ke vzniku elektrické dvojvrstvy, která obaluje cementová zrna a způsobuje, že se chovají jako uniformně nabitě částice. Navzájem se tedy odpuzují. Odpudivé elektrické síly snižují tření mezi zrny a zvyšují pohyblivost cementové kaše. Ke zvýšené pohyblivosti přispívá i mechanický efekt vodního obalu, který působí jako zábrana zabraňující vzájemnému zaklesnutí zrn a tvorbě cementových vloček.

Prakticky použitelný plastifikátor musí nejen vykazovat plastifikační efekt, ale musí být navíc stabilní v silně alkalickém prostředí a v prostředí s nadbytkem vápenatých iontů, nesmí vytvářet nerozpustné sloučeniny ( $Ca^{2+}$  soli), které by blokovaly hydratační pochody, při míchání betonové směsi nesmí mít přehnaný provzdušňující účinek a musí být inertní vůči přidané ocelové výztuži.

Plastifikátory můžeme rozdělit do tří skupin:

- založeny na povrchové aktivitě sulfitových výluhů – hlavní účinnou složkou těchto výluhů je ligninsulfonan vápenatý, který je v cementové kaši stálý a nemá nežádoucí vedlejší účinky
- sodné karboxylové hydrokyseliny – zpravidla se používají ve formě vodného roztoku s 30 % obsahem účinné látky
- výrobky na bázi hydrolyzovaného škrobu [2; 3]

### **Superplastifikační přísady**

Superplastifikační přísady jsou v podstatě plastifikační přísady s velmi silným ztekutujícím účinkem, který ale většinou trvá jen určitou krátkou dobu – proto se obvykle přidávají do betonu podle zvláštních pravidel až v místě použití krátce před použitím. Umožňují větší manipulaci s množstvím vody s dávkou cementu.

Superplastifikátory také můžeme rozdělit na tři skupiny:

- vyrobeny za kondenzace sulfonového naftalenu a s formaldehydem (SNF)
- vyrobené na bázi sulfonové melaminformaldehydové pryskyřice (SMF)
- polykarboxylové estery-polykarboxyláty (PLC) [2; 3]

## **3 Experimentální část**

V experimentální části jsem prověřovala a zjišťovala vlastnosti a charakteristiky použitých surovin pro moje zkoušky. Jednalo se zejména o různé druhy komerčně používaných plastifikátorů, jejich parametry v návaznosti na vliv koncentrace při výrobě připravovaných zkušebních směsí a doporučené dávkování se zjištěním tlakových pevností vzorků. V neposlední řadě jsem též prověřovala účinnost kavitované vody při jejich náhradě s ohledem na propojení zjištěných výsledků včetně pevnostních tlakových charakteristik navrhovaných směsí.

### **3.1 Suroviny pro zkoušky**

Mezi základní suroviny, které byly používány pro výrobu testovaných tělísek, patřily uvedené různé druhy plastifikátorů a superplastifikátorů (jeden volně prodejný a tři používané ve výrobě), cement, záměsová voda bez úpravy a voda upravená (kavitovaná).

#### **3.1.1 Plastifikátory pro zkoušky**

Vlastní zkoušky byly nejprve prováděny za použití různých druhů plastifikátorů, jejichž charakteristiky jsou uvedeny níže. Zkoušené plastifikátory jsou jak běžně prodávané, tak speciální pro sériovou výrobu betonových dílců, které byly nosnou kostrou celého systému navrhovaných směsí a dále s posouzením s kavitovanou vodou.

##### **3.1.1.1 Den Braven**

Je to plastifikační přísada do betonových směsí umožňující snazší zpracování betonových směsí, jejich transport a následné ukládání. Nezvyšuje obsah vzduchu ve směsi, neovlivňuje provzdušnění dosažené vhodnou provzdušňovací přísadou. Plastifikátor přidáváme do záměsové vody nebo s výhodou vyššího účinku do již vlhké směsi ke konci míchání.

Za výhody tohoto plastifikátoru považujeme snižování spotřeby vody, prodlužování zpracovatelnosti a zvyšování soudržnosti, nivelační schopnosti, zvyšování pevnosti betonu, snižování výskytu smršťovacích trhlin, neobsahuje chloridy – je proto vhodný do armovaných a předpjatých betonů a je nehořlavý a fyziologicky neškodný.

Tato plastifikační přísada se používá především pro výrobu pohledových betonů, prefabrikátů, předpjatého betonu nebo průmyslové podlahy.

Tabulka 2: Technické údaje pro plastifikátor Den Braven

Technické údaje pro Den Braven			
Hustota [kg·dm <sup>-3</sup> ]	Doporučené dávkování [%]	Max. obsah chloridu [%]	Max. obsah alkálií [%]
±1,15	0,6–1,5	<0,1	<8

Zdroj: [11]

### 3.1.1.2 MC-PowerFlow 2695

Je založený na superplastifikátorech o nejnovější technologii MC-polykarboxyláty. Silná plastifikace je výsledkem vysoké rychlosti absorpce. Přidává se do betonu během míchání, nejúčinnější je však, když se přidá již do záměsové vody. Specifický funkční mechanismus umožňuje výrobu betonu s extrémně nízkým obsahem vody a jeho doba míchání je znatelně zkrácena. Umožňuje také vyrábět vysoko pevnostní betony a jeho ukládání je snazší a rychlejší. Speciální kombinace účinné látky umožňuje výrobu homogenního betonu bez segregace.

Mezi přední vlastnosti tohoto super plastifikátoru patří vysoce kvalitní betonové povrchy, krátká doba míchání, nadprůměrná úspora vody, ekonomické dávkování, a především vysoká pevnost v tlaku vyrobených výrobků.

Díky svým vlastnostem se tato přísada používá do předem smíchaných betonů, okrasných betonů, betonů s nejvyšší tekutostí a vysoko pevnostních betonů (vysoce výkonný beton, samozhutnitelný beton a beton s vysokou odolností proti agresivním látkám).

Tabulka 3: Technické údaje pro plastifikátor MC-PowerFlow 2695

Technické údaje pro MC-PowerFlow 2695			
Hustota [kg·dm <sup>-3</sup> ]	Doporučené dávkování [g]	Max. obsah chloridu [%]	Max. obsah alkálií [%]
±1,06	2–50	<0,1	<2,0

Zdroj: [11]

### 3.1.1.2 Murasan BWA 14

Je multifunkční směs s chemicky a fyzikálně založenými účinky. Je navržen tak, aby splňoval požadavky konkrétního odvětví výroby vysoce kvalitních výrobků. Systém chemicko-fyzikálních účinků způsobuje během výrobního procesu intenzivní disperzi cementové mazaniny, což má za následek mazavý účinek mezi kovovou formou a betonem. Výsledkem jsou zlepšené vlastnosti povrchu. Snížení vnitřního tření má za následek lepší přilnutí cementové mazaniny k agregovaným materiálům. Protože se beton lepí méně na části formy, vložky a vstřikovače, je opotřebenění zařízení sníženo. Zásadně se nepřidává do suché směsi.

Tento plastifikátor je bez chloridů, zvyšuje pevnost zelených betonů, zlepšuje texturu betonu, urychluje konečnou pevnost betonu, zvyšuje nepropustnost, zvyšuje odolnost vůči ledu a rozmrazovacím solím a má vysokou produkční bezpečnost.

Používá se především na výrobu betonové dlažby, obrubníků nebo chodníkové dlažby.

Tabulka 4: Technické údaje pro plastifikátor Murasan BWA 14

Technické údaje pro Murasan BWA 14			
Hustota [kg·dm <sup>-3</sup> ]	Doporučené dávkování [g]	Max. obsah chloridu [%]	Max. obsah alkálií [%]
±1,19	2–15	<0,1	<3,0

Zdroj: [11]

### 3.1.1.3 Muraplast FK 43

Muraplast FK 43 je superplastifikátor a lze jej použít v kombinaci se všemi standardními typy cementu. Způsobuje silnou plastifikaci betonu, i když přidaná množství jsou malá. Agregace cementových částic je snížena, cement je lépe smočen. Tím se vytvoří snadno zpracovatelný beton, který vyžaduje malé zhutnění. Přidává se do betonu během míchání, nejúčinnější je, když je přidán už do záměsové vody. Doba míchání směsi by měla být dostatečně dlouhá, aby směs mohla během míchání rozvinout svůj plastifikační účinek.

Mezi jeho vlastnosti patří například intenzivní disperze cementové mazaniny, dobrá stejnorodost betonu, snížení vnitřní síly v betonu, snížení množství záměsové vody nebo cenová efektivita.

Tento plastifikátor získává uplatnění ve výrobě prefabrikátů, železového betonu a industriální podlahy.

Tabulka 5: Technické údaje pro plastifikátor Muraplast FK 43

Technické údaje pro Muraplast FK 43			
Hustota [kg·dm <sup>-3</sup> ]	Doporučené dávkování [g]	Max. obsah chloridu [%]	Max. obsah alkálií [%]
±1,14	2–40	<0,1	<4,5

Zdroj: [11]

### 3.1.2 Cementy pro zkoušky

V připravovaných vzorcích byly použity tři druhy cementů podle vyráběných tříd a to 32,5 R; 42,5 R a 52,5 R. Na těchto základních pevnostních třídách byly zkoušeny účinky plastifikátorů v různých poměrech jejich dávkování.

### 3.1.1.1 Cement 32,5 R

Nejnižší pevnostní třídu měl cement společnosti Českomoravský cement a. s. ze závodu Mokrá. Jednalo se o portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, kde se podle tohoto používaného označení mohlo poznat, že se jedná o portlandský směsný cement obsahující celkové množství vysokopecní granulované strusky (S) a vápence s obsahem celkového organického uhlíku, který nepřesahuje 0,20 % hmotnosti (LL), mezi 21–35 % hmotnosti, pevnostní třídy 32,5 s vysokými počátečními pevnostmi. Složení je uvedeno v tabulce č. 6 a mechanické vlastnosti v tabulce č 7.

Tabulka 6: Složení cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Označení složek	Název složek	Podíl složek [%]
Hlavní	Mletý portlandský slínek	65–79
	Vysokopecní struska	21–35
Doplňující	Síran vápenatý a jiné	0–5

Zdroj: [10]

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Parametr pevnosti	Doba zrání [dny]	Průměrná pevnost [MPa]
V tlaku	1	9
	7	35
	28	47
V tahu za ohybu	1	2
	7	7
	28	8

Zdroj: [10]

### 3.1.1.2 Cement 42,5 R

Dále byl použit cement s pevnostní třídou 42,5. Tento cement byl od společnosti Lafarge Cement, a.s. ze závodu Čížkovice. Jednalo se o portlandský cement s označením CEM I 42,5 R. Označení říká kromě toho, že cement byl portlandský o pevnostní třídě 42,5, také to, že tento používaný cement měl vysoké počáteční pevnosti.

Tabulka 8: Složení cementu CEM I 42,5 R

Označení složek	Název složek	Podíl složek [%]
Hlavní	Mletý portlandský slínek	95–100
Doplňující	Síran vápenatý a jiné	0–5

Zdroj: [10]

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R

Parametr pevnosti	Doba zrání [dny]	Průměrná pevnost [MPa]
V tlaku	2	32
	28	58

Zdroj: [10]

### 3.1.1.3 Cement 52,5 R

Nakonec byl použit cement od společnosti Českomoravský cement a. s. ze závodu Mokrá. Jednalo se o portlandský cement CEM I 52,5 R, kde se podle označení jedná o portlandský cement pevnostní třídy 52,5 s vysokými počátečními pevnostmi.

Tabulka 10: Složení cementu CEM I 52,5 R

Označení složek	Název složek	Podíl složek [%]
Hlavní	Mletý portlandský slínek	95–100
Doplňující	Síran vápenatý a jiné	0–5

Zdroj: [10]

Tabulka 11: Mechanické vlastnosti CEM I 52,5 R

Parametr pevnosti	Doba zrání [dny]	Průměrná pevnost [MPa]
V tlaku	1	25
	7	57
	28	65
V tahu za ohybu	1	6
	7	8
	28	9

Zdroj: [10]

### 3.1.3 Voda

Záměšová voda byla používána z vodovodního řadu, a to jako hydratační a reologická pro zajištění vhodné konzistence připravovaných směsí, tak i při hydrotermálním zpracování vzorků. Dále se z této vody vyráběla ve speciálním kavitačním přístroji MultiJet zařízení voda kavitovaná, která byla další zkušební sérií v tomto výzkumu. Dále byla při zkouškách použita voda demineralizovaná pro ověření, zda minerály ve vodě mají vliv na tlakové pevnosti.



## 3.2 Příprava zkušebních směsí

Při přípravě zkušebních vzorků byly použity tři základní kombinace směsí, a to se třemi druhy cementu bez plastifikátoru, poté s přidavkem plastifikátorů a jako poslední zkouška byl vzorek s kavitovanou vodou. Jednotlivé zkoušky budou vyhodnoceny zejména formou zjišťování tlakových pevností vzorků a v závěru ekonomickým vyhodnocením jednotlivých souborů zkoušek.

### 3.2.1 Zkoušky směsí cement – voda bez plastifikátoru

Jako první byly prováděny zkoušky s cementy o pevnostních třídách 32,5; 42,5 a 52,5 bez použití plastifikátorů abych zjistila, jaké mají základní tlakové pevnosti při námi používaných pracovních postupech v této práci. Na základě takto získaných hodnot jsem posuzovala působení plastifikátorů na tlakové pevnosti mnou připravovaných vzorků.

Jako zkoušku pro porovnání pevností v tlaku jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm s jednotlivými druhy cementu a to 32,5 R; 42,5 R a 52,5 R čistě bez jakéhokoliv přidání některého z vybraných plastifikátorů pouze s vodou. V těchto směsích jsem předpokládala postupný náběh pevnosti podle tříd cementů, což se také potvrdilo. Současně bylo také důležité použití co nejmenšího množství záměsové vody tak, aby připravenou směs cementové kaše bylo možné zamíchat a ztuhnout.

Na začátku celé zkoušky jsem si nejprve pomocí digitální váhy odvážila přesně 120 g cementu třídy 32,5 R do menší plastové misky. Poté jsem si do další plastové misky odvážila pomocí té stejné váhy 30 ml pitné vody. Do připravené plastové misky s 30 ml pitné vody jsem pomalu nasypala již odvážených 120 g cementu a celou směs promíchala pomocí špachtle. Když se mi ve směsi vytvořily promíchané suché hrudky směsi, tak jsem pomocí vibračního stolku dosáhla právě takového stavu, kdy se ze suchých hrudek směsi začala uvolňovat záměsová voda a já byla schopna sjednotit celou směs v celek. S napohled suchou směsí jsem naplnila připravenou a olejem vymazanou kovovou formu na výrobu krychlí 20 x 20 x 20 mm nejprve z jedné poloviny a pomocí vibračního stolku tuto směs dostala zase do tekutého stavu, aby se plně rozlila po celé formě a odstranily se případné vzduchové bublinky. Poté jsem směsí naplnila i druhou polovinu formy a zase pomocí vibračního stolku dosáhla rozprostření po celé formě. Směs ve formě jsem pomocí špachtle zarovnávala do roviny. Druhý den, kdy zkušební tělíška z části zatvrdla, vyjmula jsem je z formy a uložila je do vlhkého prostředí a zahřívala na teplotu 60 °C po dobu 16 hodin, aby dosáhla konečného zatuhnutí a zatvrdnutí, a hlavně finální pevnosti v tlaku, kterou jsem v další části zkoušky

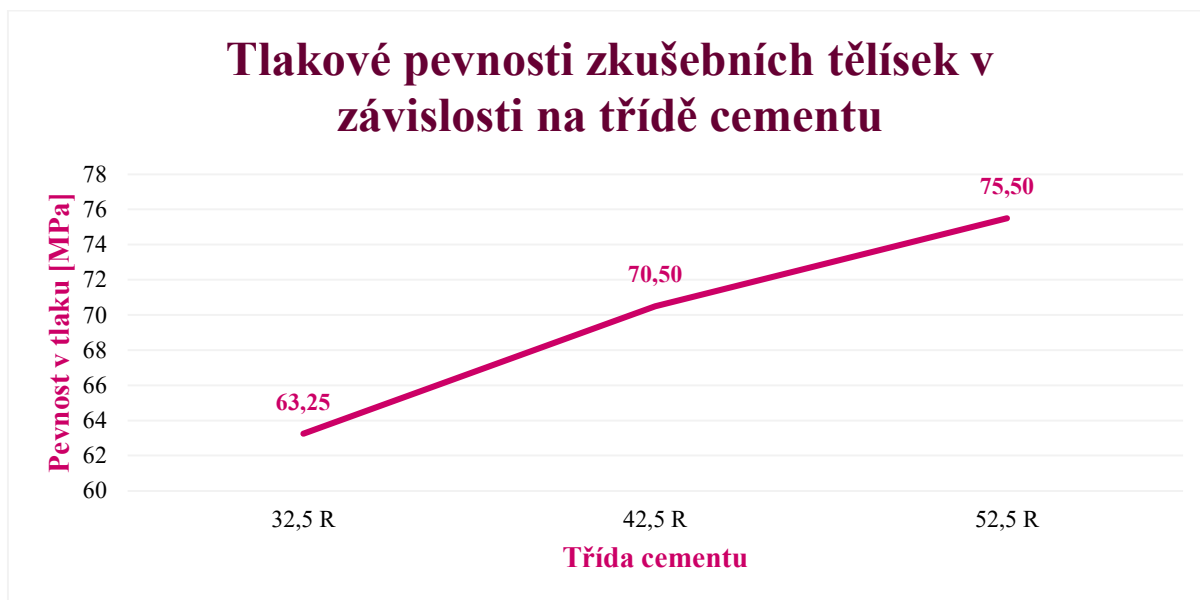
zkoumala. Zkoušku pevnosti v tlaku jsem prováděla po vysušení tělísek při teplotě 60 °C po dobu 4 hodin a poté zkoušela na hydraulickém lise tlakové pevnosti vzorků. Zkouška se prováděla tak, že jsem mezi dvě proti sobě působící kovové plochy uložila pokaždé jedno tělísko. Stroj jsem zapnula a čekala do té doby, než se tělísko úplně rozpadlo a výslednou zatěžovací sílu si zapsala a pracovala s ní i nadále. Takto jsem zkoumala každé vyrobené tělísko této směsi.

Finální naměřené a spočítané hodnoty pevností v tlaku zkušebních tělísek vyrobených ze směsi bez plastifikátoru jsem uvedla níže v tabulce č. 12 a používala je jako výchozí pevnostní hodnoty i při dalších zkouškách vyrobených směsí.

Tabulka 12: Určení pevností v tlaku tělísek bez plastifikátorů

Třída cementu	Zatěžující síla [kN]					Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
	1.	2.	3.	4.	Ø		
<b>32,5 R</b>	23,4	29,3	23,1	25,5	25,3	400	<b>63,25</b>
<b>42,5 R</b>	30,1	27,8	26,8	28,2	28,2		<b>70,50</b>
<b>52,5 R</b>	28,9	31,4	28,5	31,8	30,2		<b>75,50</b>

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 1: Nárůst pevností v tlaku tělísek v závislosti na třídě cementu

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.2 Zkoušky s cementem 32,5 R, vodou a vzorky plastifikátorů

Při zkouškách plastifikátorů s cementem 32,5 R se vyrobená zkušební tělíska vyráběla za použití čtyř druhů plastifikátorů na vzorcích 20 x 20 x 20 mm. Jejich vyhodnocení byla prováděna pomocí tlakových pevností. Těmito zkouškami jsem zjišťovala nejenom změnu tlakových pevností vzorků ale i změnu množství záměsové vody ve zkušebních směsích. Jednotlivé výsledky zkoušek byly vyhodnoceny vždy graficky a poté v závěru kapitoly porovnány vzájemně mezi sebou.

#### 3.2.2.1 Příprava tělísek s plastifikátorem Den Braven

Jako první zkoušku s plastifikátorem jsem provedla výrobu tří zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi z cementu 32,5 R, záměsové vody a tentokrát i s plastifikátorem Den Braven, který je volně dostupný ke koupi v obchodě. Celý postup výroby byl stejný jako při přípravě zkušebních tělísek bez plastifikátoru, jenom jsem s postupným nárůstem množství daného plastifikátoru (1; 3 a 6 g, což je v přepočtu 0,8 %; 2,5 % a 5 % z hmotnosti cementu) redukovala množství záměsové vody. Postup vlastní přípravy probíhal tak, že jsem vždy přidávala do plastové misky záměsovou vodu již s redukováným množstvím a poté přidala plastifikátor. Tato směs musela být vždy schopná uvolnit potřebnou vodu pro celkové sjednocení cementu v cementovou kaši. V tomto případě jsem očekávala postupný nárůst konečných pevností v tlaku. Se získanými hodnotami zatěžující síly v kN jsem pokračovala v dalších výpočtech.

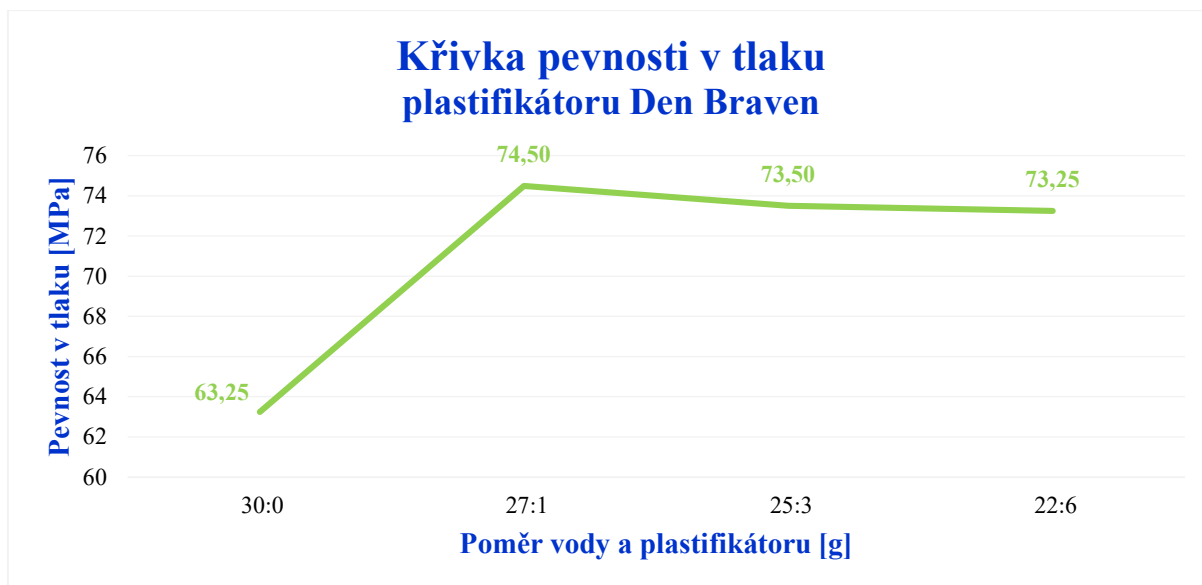
Finální výsledky pevností v tlaku zkušebních tělísek s plastifikátorem Den Braven jsem uvedla v tabulce č. 13, ze které vychází i následující graf č. 2.

Tabulka 13: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Den Braven a CEM 32,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	25,3	400	<b>63,25</b>
	27	1	35,5	24,0	29,8		<b>74,50</b>
	25	3	28,2	30,6	29,4		<b>73,50</b>
	22	6	28,8	29,7	29,3		<b>73,25</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 2: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Den Braven s CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.2.2 Příprava tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695

Další zkouškou jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi cementu 32,5 R, záměsové vody a plastifikátoru MC-PowerFlow 2695, který se používá ve velkovýrobě a je znám svou radikálně vyšší pevností v tlaku. Postup výroby byl i u těchto zkušebních tělísek stejný jako v kapitole 3.2.2.1.

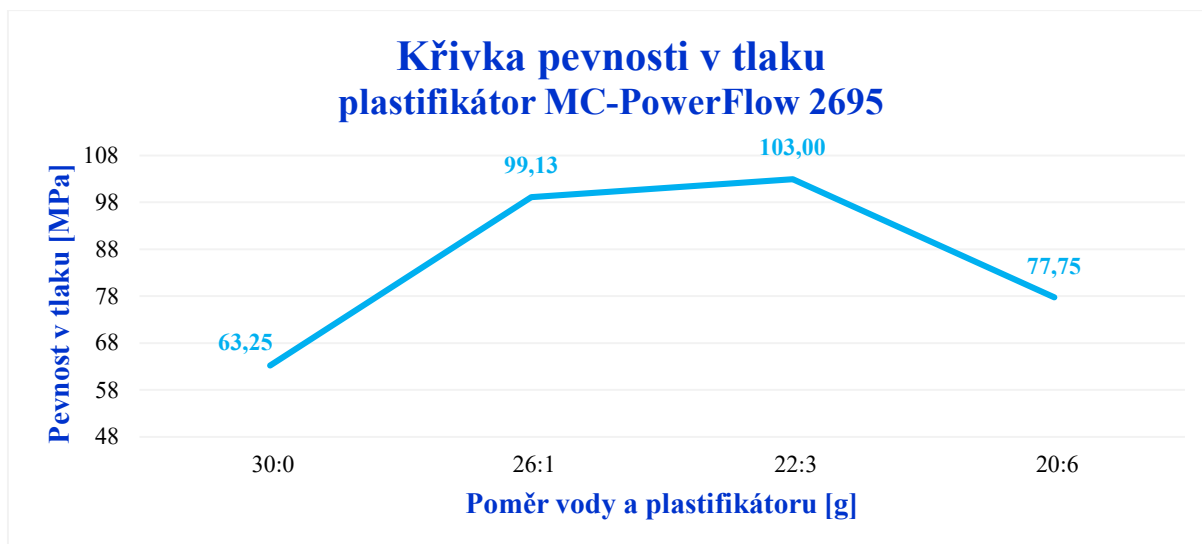
Naměřené a následně spočítané hodnoty pevností v tlaku vyrobených zkušebních tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 jsem uvedla v tabulce č. 14, ze které vychází i následující graf č. 3.

Tabulka 14: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a CEM 32,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	25,3	400	<b>63,25</b>
	26	1	38,3	41,0	39,7		<b>99,13</b>
	22	3	40,4	42,0	41,2		<b>103,00</b>
	20	6	30,8	31,3	31,1		<b>77,75</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 3: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor MC-PowerFlow 2695 s CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.2.3 Příprava tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14

Pro další zjišťování pevností v tlaku jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek z cementu pevnostní třídy 32,5 R, záměsové vody potřebné pro sjednocení směsi a plastifikační přísady Murasan BWA 14, který se také používá ve velkovýrobě betonových výrobků ve stavebnictví. Postup výroby byl stejný jako v kapitole 3.2.21.

Při výrobě zkušebních tělísek z cementu třídy pevnosti 32,5 R, potřebné záměsové vody a plastifikátoru Murasan BWA 14, kdy jsem daného plastifikátoru přidala do zkušební směsi v množství 6 g (5 %), se první namíchaná zkušební tělíska během fáze zrání v sušárně rozpadla, jak je zobrazeno na níže uvedeném obr. č. 4, a proto jsem musela tuto směs míchat znovu s větším množstvím záměsové vody.



Obr. 3: Destrukce vzorků ze směsi CEM 32,5 R, voda a plastifikátor Murasan BWA 14 (6 g)

Zdroj: Vlastní šetření

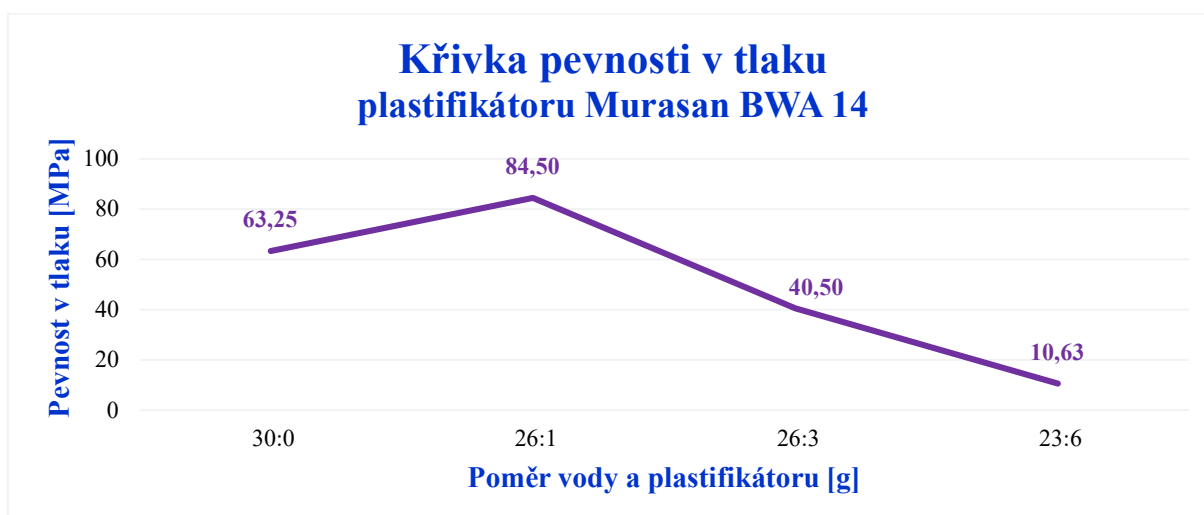
Naměřené a za pomoci již zjištěných zatěžovacích sil, které jsem získala díky zkoušce tlakových pevností, dodatečně spočítané hodnoty pevností v tlaku vyrobených zkušebních tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 jsem uvedla v níže uvedené tabulce č. 15, ze které jsem zobrazila i následující grafické zobrazení pomocí grafu č. 4.

Tabulka 15: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a CEM 32,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	25,3	400	<b>63,25</b>
	26	1	35,0	32,5	33,8		<b>84,50</b>
	26	3	16,7	15,7	16,2		<b>40,50</b>
	23	6	4,5	4,0	4,2		<b>10,63</b>

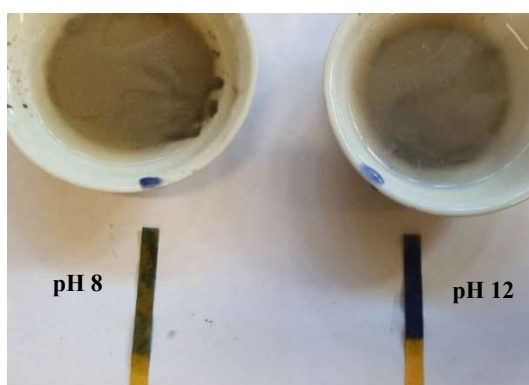
Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



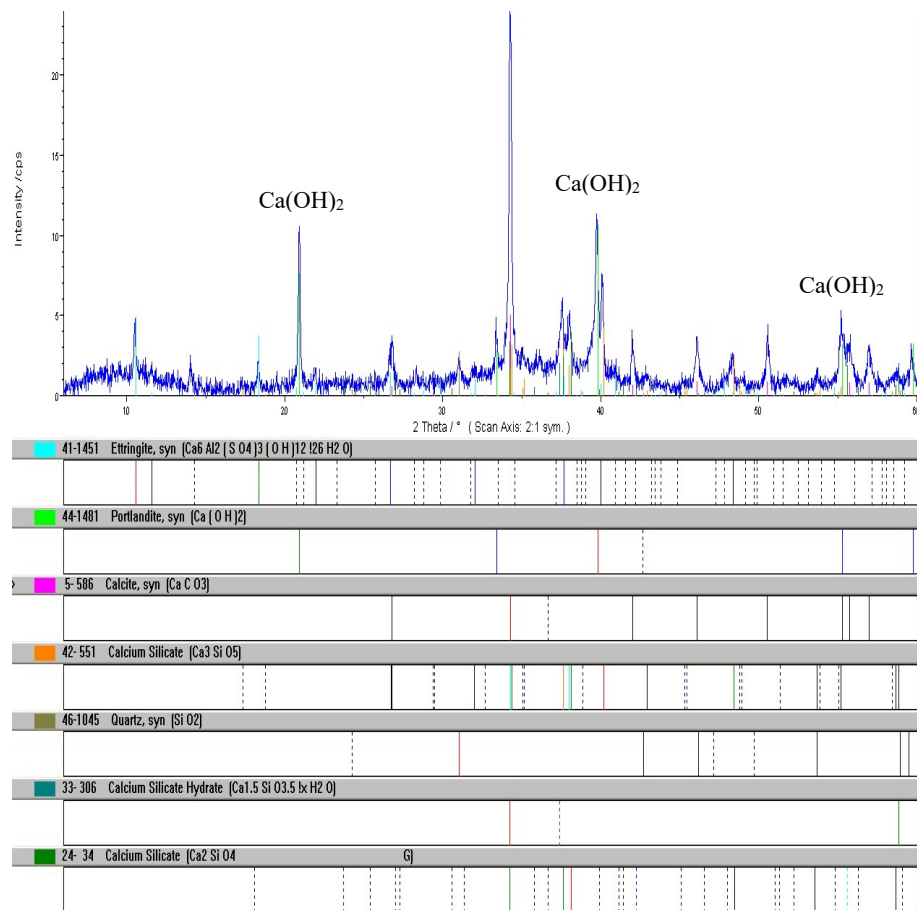
Graf 4: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Murasan BWA 14 s CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření



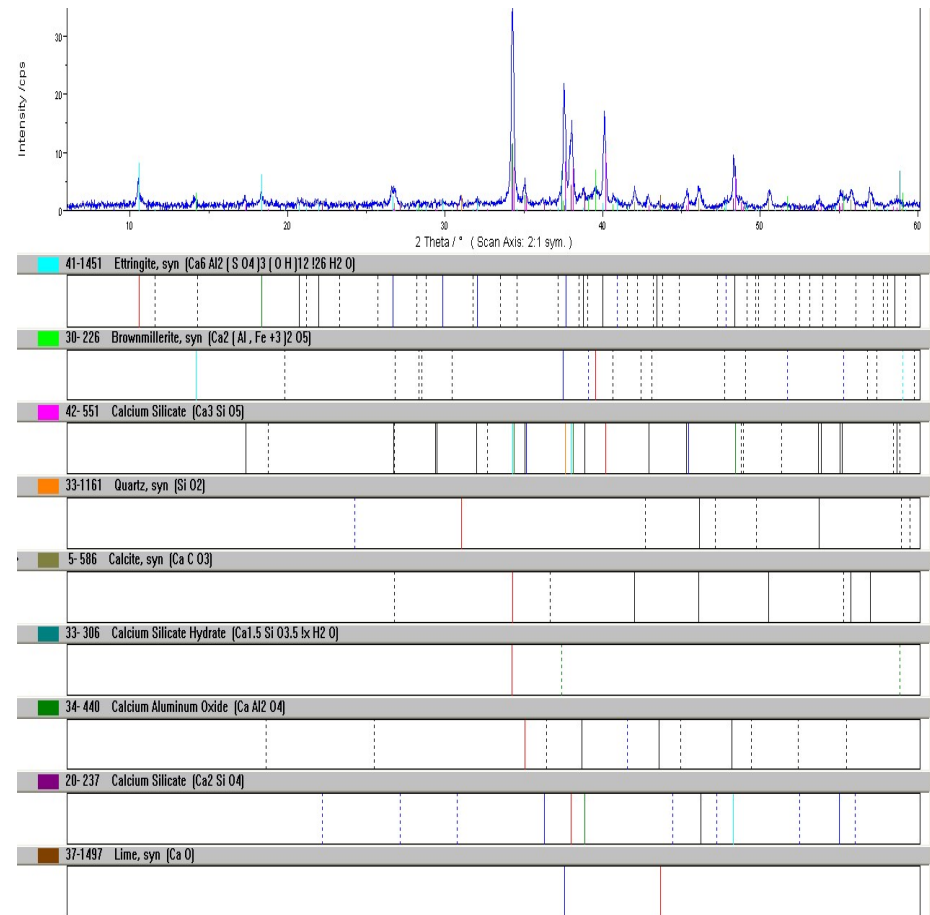
Obr. 4: Určení pH vzorku s a bez plastifikátoru Murasan BWA 14 v množství 6 g (5 %)

Zdroj: Vlastní šetření



Obr. 5: RTG tělísek s vodou bez použití plastifikátoru

Zdroj: Vlastní šetření



Obr. 6: RTG vzorku voda – plastifikátor Murasan BWA 14 v množství 6 g (5 %) z hm. c.

Zdroj: Vlastní šetření

Zajímala mě nízká pevnost v tlaku uvedeného systému, kterou jsem prověřila tak, že jsem si nechala změřit podíl krystalických látek na vzorcích bez použití plastifikátoru, jak je vidět na prvním obrázku č. 6 a poté také na vzorku s maximálním použitím plastifikátoru Murasan BWA 14, tedy v množství 5 % z hmotnosti cementu, což je v tomto případě 6 g plastifikátoru na přípravu vzorků.

Ze získaných výsledků bylo patrné, že jsou jasné ostré píky u portlanditu na obrázku č. 6 v hodnotách linie 21,0; 33,8; 39,5; a 55,2. Na dalším obrázku, tedy obr. č. 7, tyto píky chybí, z čehož vyplývá, že vyšší podíl plastifikátoru Murasan BWA 14 působí jako retardační přísada (známe např. cukr), kdy vodíky na uhlíkových řetězcích organické složky se odštěpí a dojde k záměně za vápenatý iont  $Ca^{2+}$ , přičemž volné  $OH^-$  skupiny jej naváží a vytvoří molekulu vody. Zároveň jsme zjistila, že se též změnilo i pH směsi z pH 12 na pH 8, což je další důkaz, který podpořil moji úvahu.

### 3.2.2.4 Příprava tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43

Jako poslední jsem zvolila zkoušku výrobních tělísek s cementem 32,5 R, záměsovou vodu a plastifikační přísadu, která se používá ve výrobě, Muraplast FK 43. I u této kombinace složek směsi probíhala výroba stejně jako u předešlých zkušebních směsí.

Naměřené a spočítané hodnoty tlakových pevností zkušebních tělísek s cementem 32,5 R a plastifikátorem Muraplast FK 43 jsem uvedla v tabulce č. 16, ze které vychází i následující graf č. 5.

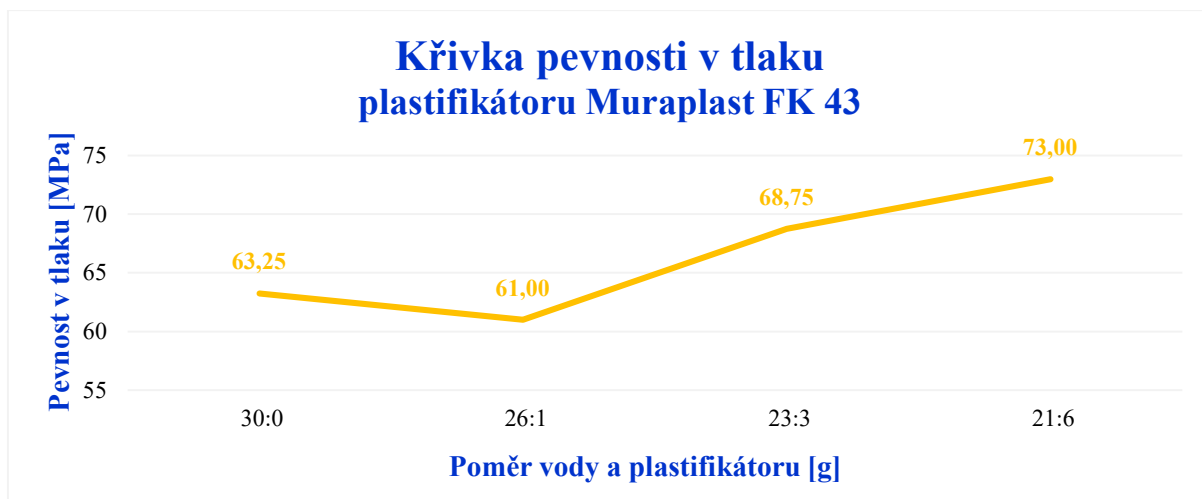
Tabulka 16: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a CEM 32,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	25,3	400	<b>63,25</b>
	27	1	24,4	24,4	24,4		<b>61,00</b>
	25	3	29,2	25,8	27,5		<b>68,75</b>
	21	6	30,2	28,2	29,2		<b>73,00</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



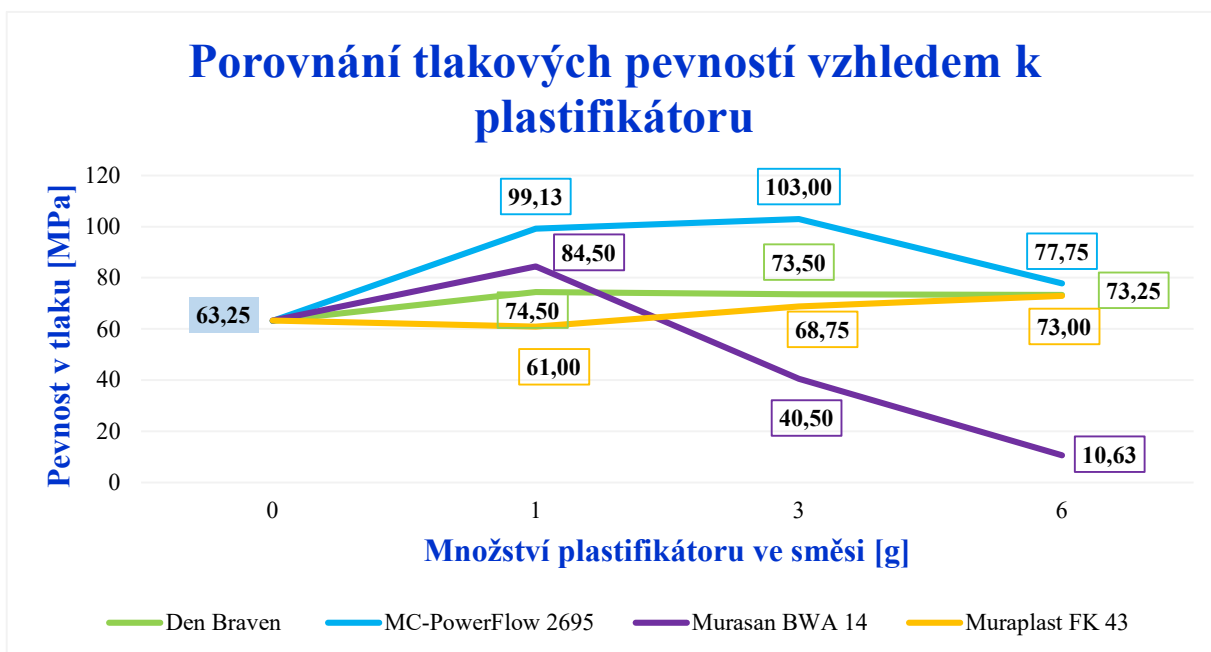


Graf 5: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Muraplast FK 43 s CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

#### 3.2.2.5 Srovnání dosažených pevností s cementem 32,5 R a plastifikátory

Na úplný závěr této kapitoly bych chtěla porovnat mezi sebou jednotlivé doposud použité plastifikátory a jejich vliv na tlakové pevnosti zjištěné za pomoci hydraulického lisu u vyrobených zkušebních tělísek namíchaných v různých poměrech cementu, vody potřebné pro rozmíchání směsi v jednotnou směs a použitého plastifikátoru. Dle následujícího grafu č. 6 jsem vyhodnotila nejúčinnější použitý plastifikátor a jeho dávkování pro zkušební směsi s cementem pevnostní třídy 32,5 R, který by ze všech použitých cementů pevnostní tříd měl dosahovat nejmenších tlakových pevností zkušebních tělísek.



Graf 6: Vyhodnocení nejúčinnějšího plastifikátoru s CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu vychází hned několik zřetelných poznatků. Jako první poznatek určíme fakt, že jako nejlépe působící plastifikátor se projevil MC-PowerFlow 2695, který nejenže dosahoval tlakových pevností až 103 MPa, ale také množství záměsové vody potřebné pro rozmíchání zkušební směsi bylo nejmenší oproti všem ostatním namíchaným zkušebním směsím s použitými plastifikátory. Na druhou stranu u zkušebních směsí s tímto plastifikátorem se projevily jeho účinky na tlakové pevnosti jenom do určitého množství plastifikační přísady. Konkrétně v mém případě se tlakové pevnosti zvyšovaly pouze do množství 3 g (2,5 %) plastifikátoru, ale od přidaných 6 g (5 %) plastifikátoru se pevnosti v tlaku začaly výrazně snižovat.

Dalším jasným poznatkem z výše uvedeného grafu je neslučitelnost plastifikátoru Murasan BWA 14 s cementem 32,5 R. Pevnost v tlaku těchto zkušebních směsí vzrostla jenom v případě množství 1 g (0,8 %) plastifikátoru ve směsi, nadále s rostoucím množstvím (a při hodnotě 6 g, což bylo 5 % z hmotnosti cementu) plastifikační přísady klesly tlakové pevnosti až na 10,63 MPa.

U plastifikátoru Den Braven zkušební tělíska s větším množstvím plastifikační přísady postupně zvyšovaly své tlakové pevnosti, ale zase při množství 6 g (5 %) plastifikační přísady se tlakové pevnosti zkušebních tělísek nepatrně snižovaly.

Nakonec u posledního plastifikátoru, kterým byl Muraplast FK 43, se nejdříve s 1 g (0,8 %) plastifikační přísady se jeho pevnost poměrně snížila oproti tlakové pevnosti tělíska bez plastifikátoru, ale poté s postupným přidáváním většího množství plastifikační přísady se pevnosti v tlaku lehce zvyšovaly.

### **3.2.3 Zkoušky s cementem 42,5 R, vodou a vzorky plastifikátorů**

Pro druhou zkoušku s plastifikátory jsem použila cement 42,5R a též zjišťovala, jak se v tomto případě změní podíl záměsové vody při přípravě zkušebních vzorků. Po vytvrnutí vytvořených zkušebních tělísek byla dále ověřovány tlakové pevnosti, které byly na konci mé práce korelovány s tlakovými pevnostmi vzorků vyrobených z kavitovanou vodou.

#### **3.2.3.1 Příprava tělísek s plastifikátorem Den Braven**

Pro první zkoušku v této kapitole, kde jsem se zabývala tlakovými pevnostmi zkušebních tělísek vyrobených ze směsí použitých plastifikátorů a cementu třídy pevnosti 42,5 R, jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi z cementu pevnostní třídy 42,5 R a přidala volně prodejný plastifikátor Den Braven. V tomto případě jsem očekávala větší nárůst pevnosti v tlaku vzhledem k předchozím zkušenostem právě s touto plastifikační přísadou.

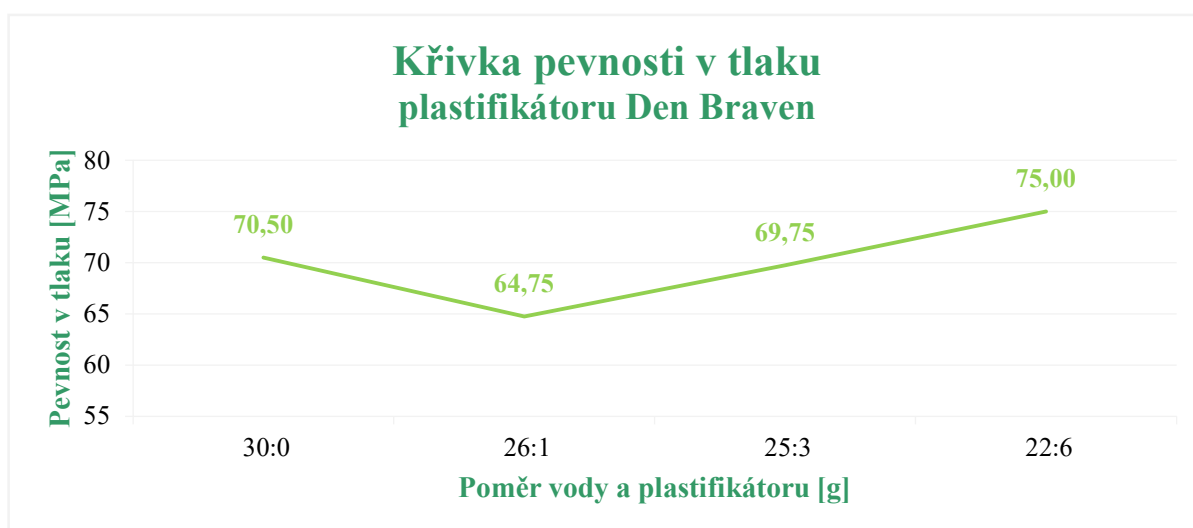
Zkoušku tlakových pevností vyrobených zkušebních tělísek jsem uvedla níže v tabulce č. 17, ze které vychází i následné grafické vyobrazení, kterého jsem dosáhla za pomoci grafu č. 7, díky kterému jsem viděla celý průběh tlakových pevností zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s cementem 42,5 R a plastifikační přísady Den Braven.

Tabulka 17: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Den Braven a CEM 42,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	28,2	400	<b>70,50</b>
	26	1	26,7	25,0	25,9		<b>64,75</b>
	25	3	31,5	24,2	27,9		<b>69,75</b>
	22	6	28,2	31,8	30,0		<b>75,00</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 7: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Den Braven s CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.3.2 Příprava tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695

Další zkouškou byla výroba tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi cementu 42,5 R, vody a plastifikátoru, který se používá v betonové velkovýrobě, MC-PowerFlow 2695. Zkoušku jsem prováděla stejně jako u předešlé zkoušky. Se získanými hodnotami jsem pokračovala ve výpočtu a stanovení pevností v tlaku.

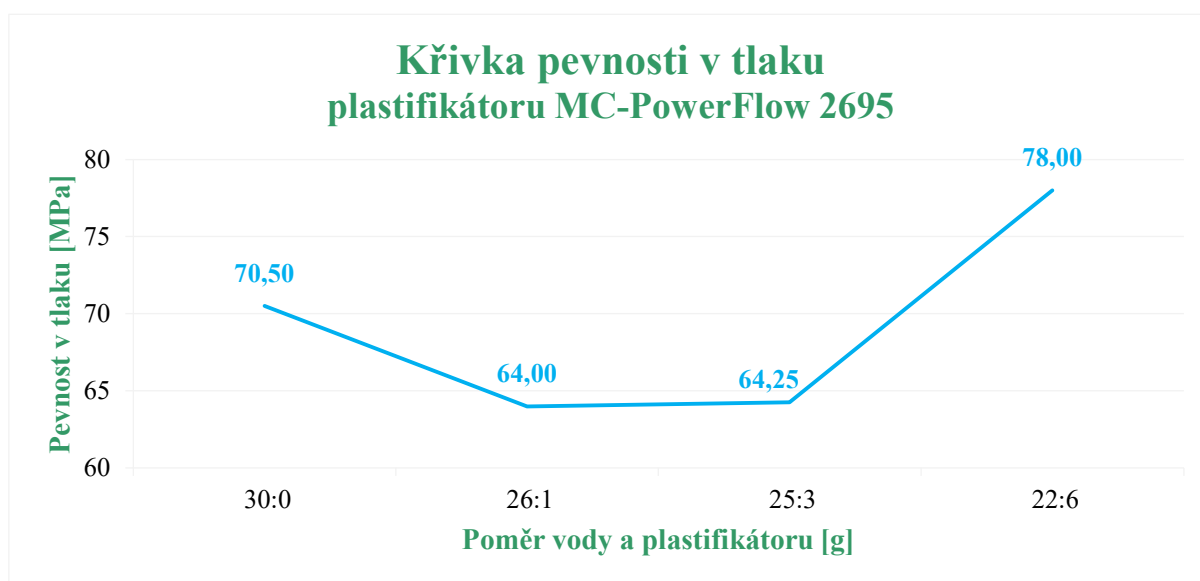
Naměřené a spočítané hodnoty pevností v tlaku vyrobených zkušebních tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 jsem uvedla v tabulce č. 18, ze které vychází i příslušný graf č. 8.

Tabulka 18: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a CEM 42,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	28,2	400	<b>70,50</b>
	26	1	27,6	23,6	25,6		<b>64,00</b>
	25	3	28,4	23,0	25,7		<b>64,25</b>
	22	6	29,0	33,3	31,2		<b>78,00</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 8: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor MC-PowerFlow 2695 s CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.3.3 Příprava tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14

Další zkoušku jsem provedla na zkušebních tělíscích 20 x 20 x 20 mm vyrobených z cementu 42,5 R, vody a plastifikátoru Murasan BWA 14, který se také používá ve velkovýrobnách. Zkoušku jsem prováděla stejně jako u předešlých zkušebních směsí (viz. kapitola 3.2.2.1) a zjištěné hodnoty si znovu zapsala a pokračovala s nimi v dalších výpočtech při stanovení pevností v tlaku.

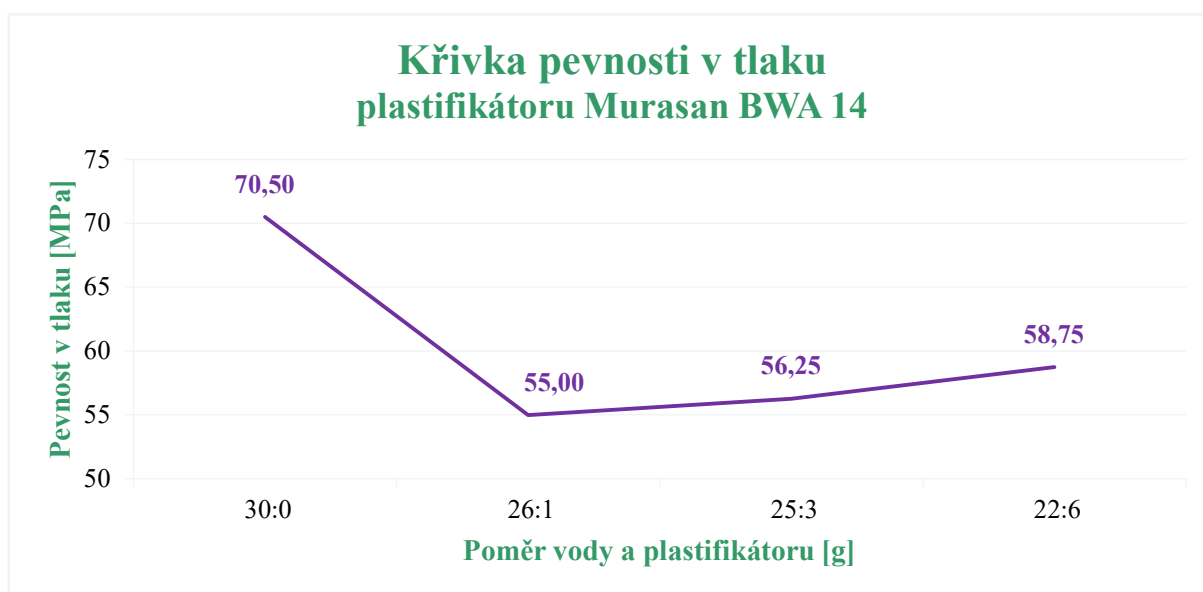
Naměřené a spočítané hodnoty pevností v tlaku zkušebních tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 jsem uvedla v tabulce č. 19, ze které vychází i následující graf č. 9.

Tabulka 19: Pevností v tlaku tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a CEM 42,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	28,2	400	<b>70,50</b>
	26	1	23,5	20,5	22,0		<b>55,00</b>
	25	3	22,3	22,6	22,5		<b>56,25</b>
	22	6	25,2	21,7	23,5		<b>58,75</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 9: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Murasan BWA 14 s CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.3.4 Příprava tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43

Jako poslední zkouškou s cementem 42,5 R jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek ze směsi cement 42,5 R, voda a plastifikátor Muraplast FK 14, který se také používá ve velkovýrobě betonu a měl by být cenově efektivní a aplikace s ním by měla být jednodušší. Zkouška probíhala stejně jako u předchozích zkušebních tělísek.

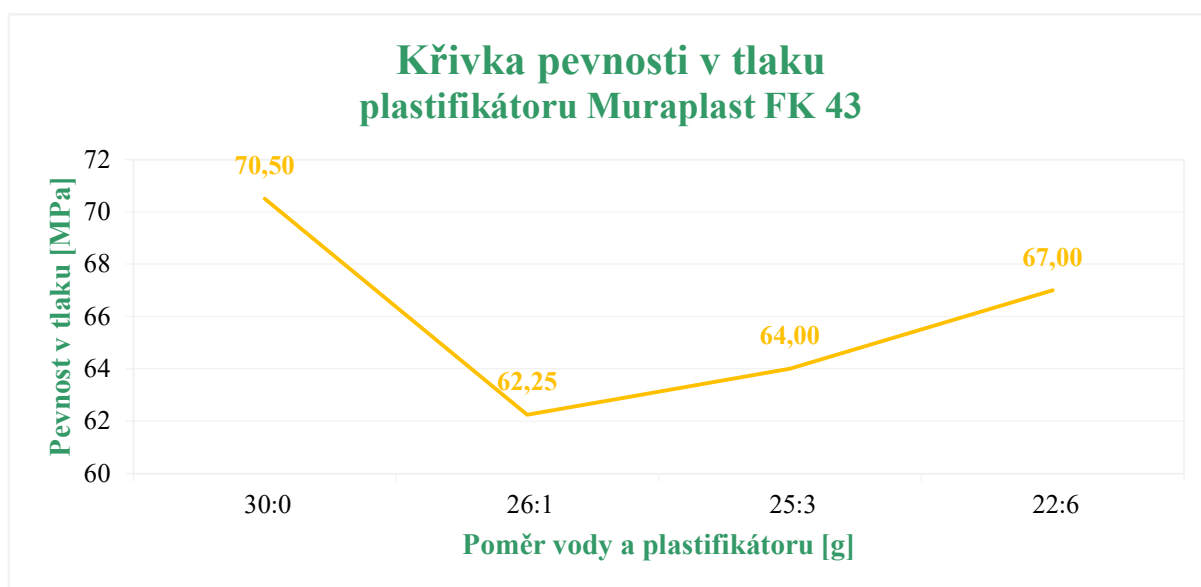
Naměřené a spočítané hodnoty pevností v tlaku zkušebních tělísek s cementem 42,5 R a plastifikátorem Muraplast FK 43 jsem uvedla v tabulce č. 20, ze které vychází i následující graf č. 10.

Tabulka 20: Pevností v tlaku tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a CEM 42,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	28,2	400	<b>70,50</b>
	26	1	23,2	26,6	24,9		<b>62,25</b>
	25	3	28,0	23,2	25,6		<b>64,00</b>
	22	6	23,4	30,1	26,8		<b>67,00</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření

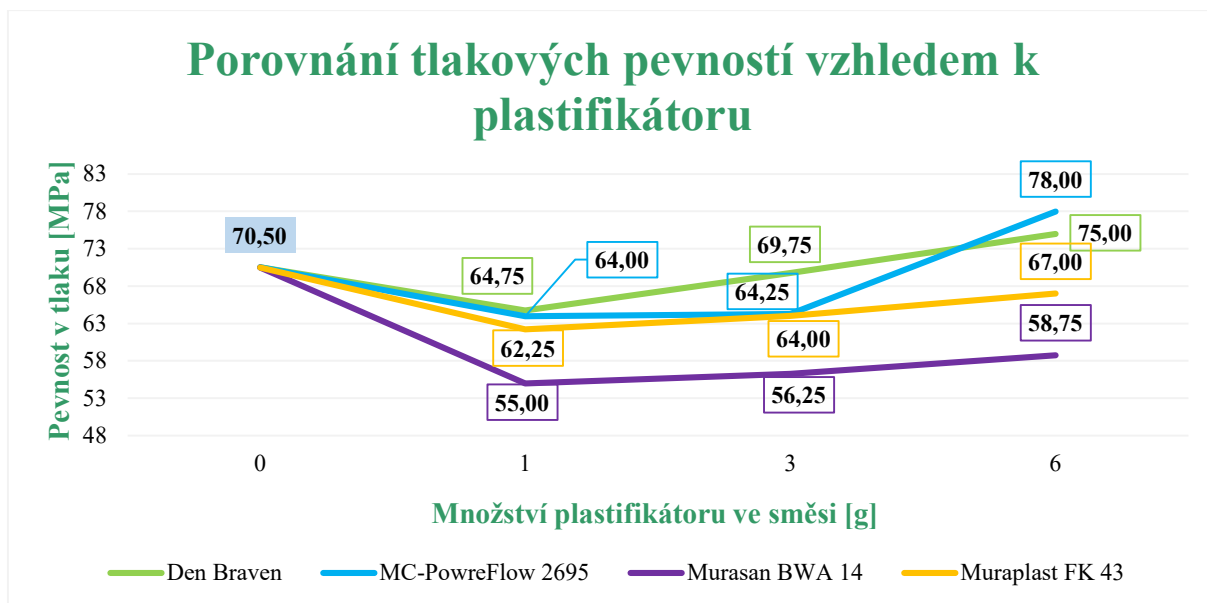


Graf 10: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Muraplast FK 43 s CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.3.5 Srovnání dosažených pevností s cementem 42,5 R a plastifikátory

Na samotný závěr této kapitoly, kde jsem zjišťovala za pomoci tlakových zkoušek s hydraulickým lisem samotné tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsí s cementem třídy pevnosti 42,5 R a přidavkem postupně zvyšovaném množství plastifikační přísady, které jsem zmiňovala jednotlivě v kapitole o použitých surovinách, jsem se rozhodla jako u předchozí pevnostní třídy cementu porovnat mezi sebou jednotlivé plastifikátory a jejich vliv na pevnosti v tlaku u zkušebních tělísek namíchaných v různých poměrech cementu, vody a toho daného plastifikátoru. Dle následujícího níže uvedeného grafu č. 11 jsem vyhodnotila neúčinnější plastifikátor pro zkušební směsi s cementem 42,5 R.



Graf 11: Vyhodnocení neúčinnějšího plastifikátoru s CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu vychází poznatek, že za neúčinnější plastifikační přísadu zkušebních směsí s cementem 42,5 R můžeme považovat plastifikátor MC-PowerFlow 2695, který svými mnou zjištěnými pevnostmi v tlaku dosahoval až pevnosti 78 MPa, ale až při množství 6 g (5 %) plastifikační přísady, při menším množství byly tlakové pevnosti menší než u zkušebních tělísek bez plastifikátoru.

Dalším výrazným poznatkem z grafu č. 11 je fakt, že plastifikátor Murasan BWA 14 sice s větším množstvím přísady ve směsi postupně zvyšoval tlakové pevnosti, ale ty zdaleka nepřekročily hranici pevnosti v tlaku zkušebních tělísek bez plastifikátoru.

Plastifikační přísada Den Braven při množství 1 g (0,8 %) ve zkušební směsi výrazně snížila pevnosti v tlaku zkušebních tělísek, ale při větším množství přísady se tlakové pevnosti zvyšovaly až nakonec při množství 6 g (5 %) plastifikační přísady dosáhly pevnosti v tlaku 75 MPa.

Poslední plastifikátor Muraplast FK 43 se neprojevil svými vysokými pevnostmi v tlaku, při začátečním množství 1 g (0,8 %) plastifikační přísady ve směsi se tlakové pevnosti snížily a s postupným přidáváním většího množství se pevnosti zvyšovaly, ale nepřevýšily velikost tlakových pevností zkušebních tělísek bez plastifikátoru.

### 3.2.4 Zkoušky s cementem 52,5 R, vodou a vzorky plastifikátorů

Pro poslední zkoušku s plastifikátory jsem použila cement 52,5 R, a i v tomto případě zjišťovala, jak se změní podíl záměsové vody při přípravě zkušebních vzorků. Po finálním

vytvrnutí vytvořených zkušebních tělísek byla dále ověřovány pevnosti v tlaku, které byly na konci mé práce porovnávány s tlakovými pevnostmi vzorků vyrobených z kavitované vody.

### 3.2.4.1 Příprava tělísek s plastifikátorem Den Braven

Jako druhou zkoušku této kapitoly jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi z cementu 52,5 R, záměsově vody a plastifikátorem Den Braven, který je volně dostupný ke koupi. Celý postup výroby byl stejný jako v kapitole 3.2.2.1.

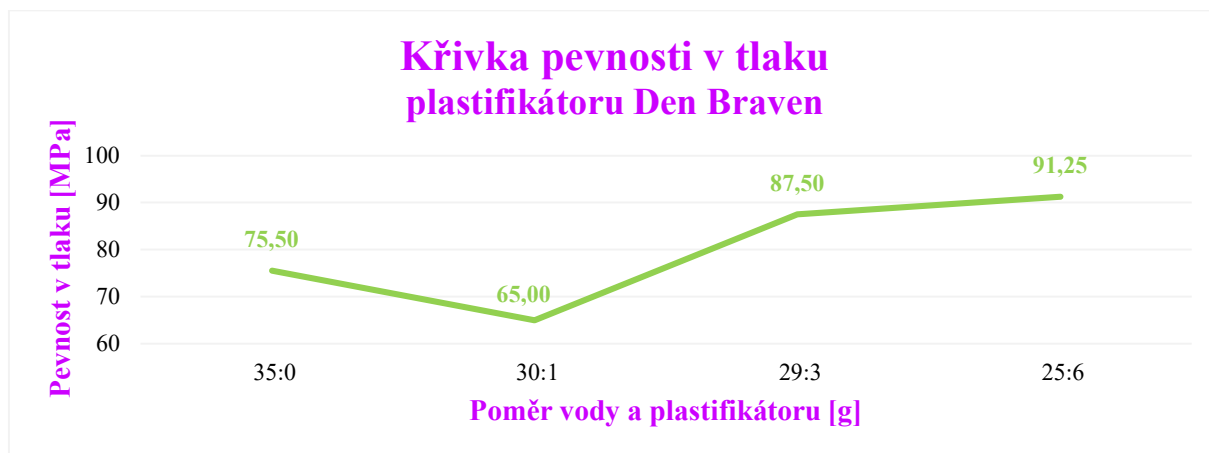
Finální výsledky tlakových pevností vyrobených zkušebních tělísek s plastifikátorem Den Braven jsem uvedla v tabulce č. 21, ze které vychází i následující graf č. 12.

Tabulka 21: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Den Braven a CEM 52,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	35	0	-	-	30,2	400	<b>75,50</b>
	30	1	25,5	26,5	26,0		<b>65,00</b>
	29	3	33,0	37,0	35,0		<b>87,50</b>
	25	6	35,5	37,5	36,5		<b>91,25</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 12: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Den Braven s CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.4.2 Příprava tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695

Další zkouškou jsem zvolila výrobu zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi cementu 52,5 R, záměsově vody a plastifikátoru MC-PowerFlow 2695, který se používá ve velkovýrobě a je znám svým vysokým přínosem na obrovskou pevnost v tlaku. Postup výroby byl i u těchto zkušebních tělísek stejný jako v předchozích zkouškách.



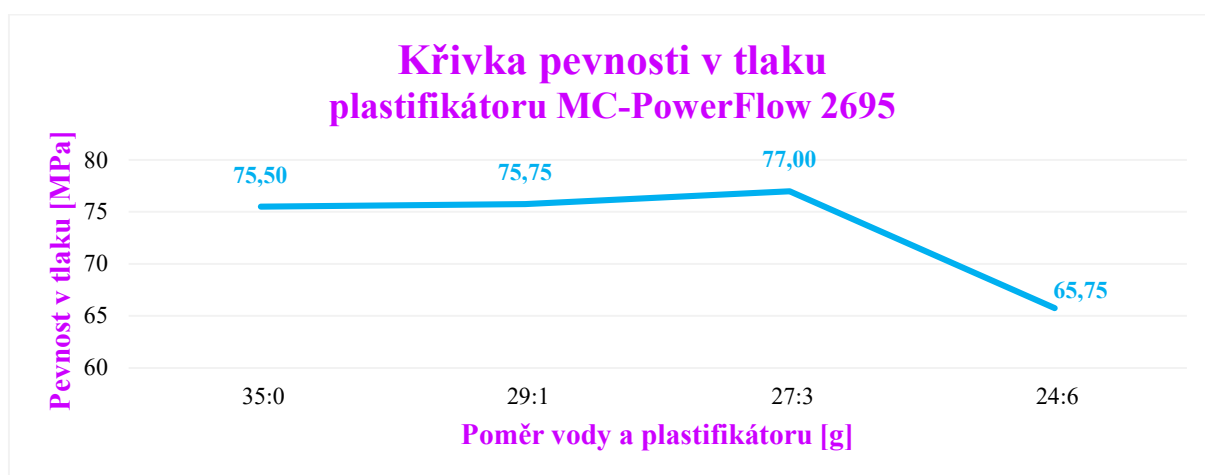
Naměřené a později spočítané hodnoty tlakových pevností vyrobených zkušebních tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a cementem pevnostní třídy 52,5 R jsem uvedla níže v tabulce č. 22, ze které vychází i později uvedený graf č. 13, kde je vidět celý průběh tlakových pevností vyrobených vzorků vzhledem k použitému a postupně redukovanému množství plastifikační přísady MC-PowerFlow 2695.

Tabulka 22: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a CEM 52,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	35	0	-	-	30,2	400	<b>75,50</b>
	29	1	29,4	31,1	30,3		<b>75,75</b>
	27	3	27,5	34,0	30,8		<b>77,00</b>
	24	6	24,0	28,5	26,3		<b>65,75</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 13: Tlaková pevnost vzorků v závislosti voda – plastifikátor MC-PowerFlow 2695 s CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.4.3 Příprava tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14

Třetí zkoušku této kapitoly jsem provedla na zkušebních tělískách 20 x 20 x 20 mm vyrobených z cementu 52,5 R, záměsové vody a plastifikační přísady Murasan BWA 14, který se také používá ve velkovýrobě. Zkoušku jsem prováděla stejně jako u všech předešlých zkušebních směsí.

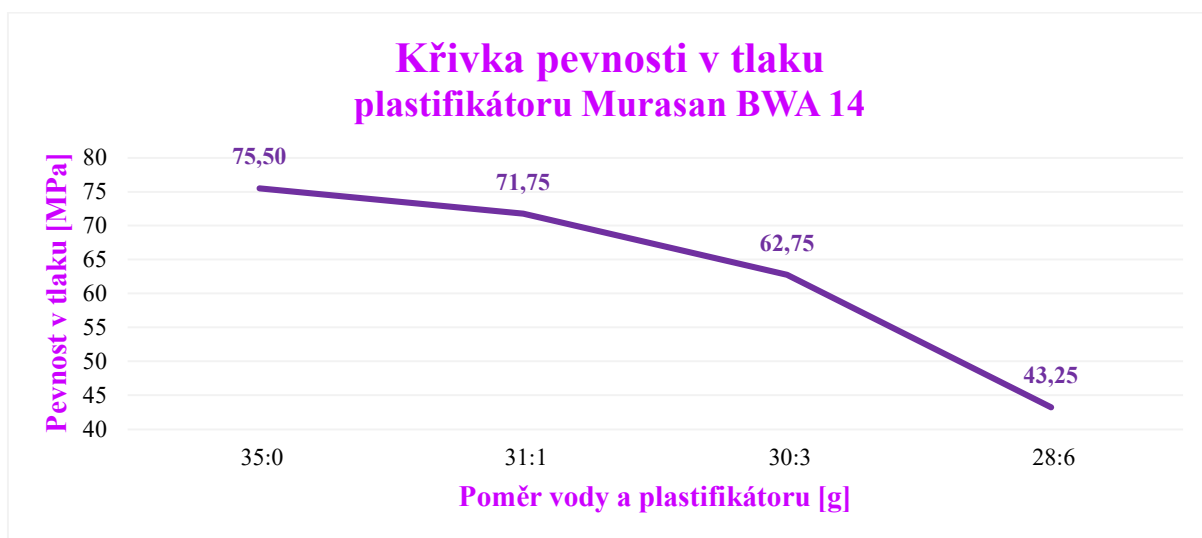
Naměřené a spočítané hodnoty pevností v tlaku vyrobených zkušebních tělísek s plastifikační přísadou Murasan BWA 14 jsem uvedla v následující tabulce č. 23, ze které vychází i následující graf č. 14.

Tabulka 23: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a CEM 52,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	35	0	-	-	30,2	400	<b>75,50</b>
	31	1	28,2	29,2	28,7		<b>71,75</b>
	30	3	25,9	24,2	25,1		<b>62,75</b>
	28	6	18,2	16,4	17,3		<b>43,25</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 14: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Murasan BWA 14 s CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

#### 3.2.4.4 Příprava tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43

Jako poslední část této kapitoly jsem zvolila zkoušku tělísek s cementem 52,5 R, záměsovou vodu a plastifikační přísadou, která se používá ve výrobě, Muraplast FK 43. I u této kombinace složek probíhala výroba stejně jako u všech předešlých zkušebních směsí této kapitoly.

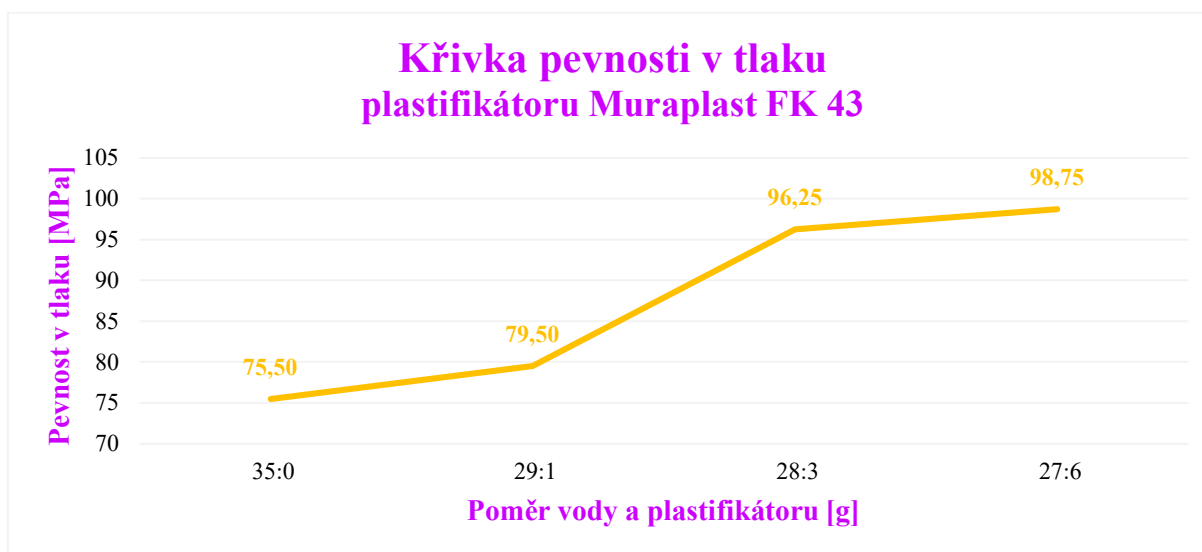
Naměřené a následně spočítané hodnoty tlakových pevností zkušebních tělísek s cementem 52,5 R a plastifikátorem Muraplast FK 43 jsem uvedla v níže uvedené tabulce č. 24, ze které vychází i následující graf č. 15.

Tabulka 24: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a CEM 52,5 R

Složky směsi [g]			Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Plastifikátor	1.	2.	Ø		
120	35	0	-	-	30,2	400	<b>75,50</b>
	31	1	28,2	29,2	28,7		<b>71,75</b>
	30	3	25,9	24,2	25,1		<b>62,75</b>
	28	6	18,2	16,4	17,3		<b>43,25</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez plastifikátoru byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření

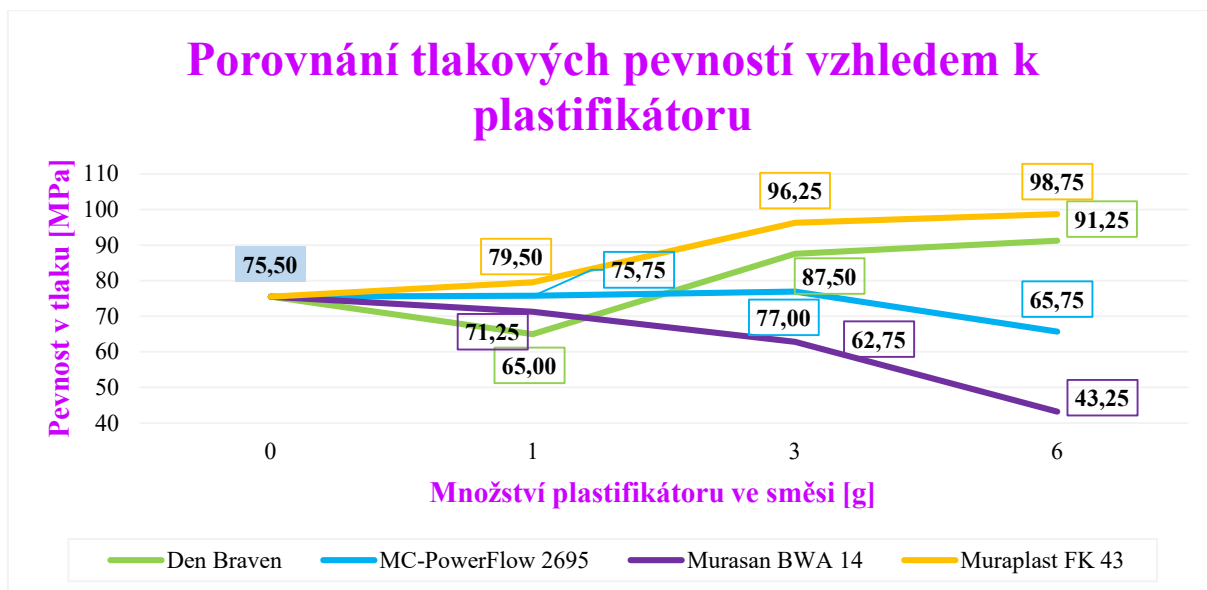


Graf 15: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Muraplast FK 43 s CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.2.4.5 Srovnání dosažených pevností s cementem 52,5 R a plastifikátory

K závěru celé této kapitoly bych mezi sebou chtěla vyhodnotit jednotlivé plastifikační přísady a jejich vliv na tlakové pevnosti u zkušebních tělísek namíchaných v různých poměrech cementu, vody a toho daného plastifikátoru. Dle následujícího grafu č. 16 jsem vyhodnotila nejúčinnější plastifikátor pro zkušební směsi s cementem 52,5 R.



Graf 16: Vyhodnocení neúčinnějšího plastifikátoru s CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu vychází hned několik poznatků. Nejprve si můžeme všimnout, že pouze v této kapitole nevyšel za neúčinnější plastifikátor MC-PowerFlow 2695, ale plastifikátor Muraplast FK 43, který po celou dobu přidávání různého množství plastifikační přísady (1; 3 a 6 g, což je v přepočtu 0,8 %; 2,5 % a 5 % z hmotnosti cementu) nesnížil své tlakové pevnosti pod hranici tlakových pevností zkušebních tělísek bez plastifikátoru a dosahoval pevnosti v tlaku i 98,75 MPa.

U plastifikační přísady MC-PowerFlow 2695 můžeme pozorovat fakt, že po celou dobu přidávání plastifikátoru se tlakové pevnosti zkušebních tělísek zvyšovaly, ale při množství 6 g (5 %) plastifikační přísady ve zkušební směsi se tlakové pevnosti výrazně snížily na hodnotu 65,75 MPa.

Tlakové pevnosti zkušebních tělísek s přidavkem plastifikátoru Murasan se podle očekávání a zkušeností z předešlých výsledků zkušebních tělísek namíchaných s touto plastifikační přísadou postupně s větším množstvím plastifikátoru více a více snižovaly až nakonec při množství 6 g (5 %) plastifikační přísady spadly na hodnotu 43,25 MPa.

U posledního použitého plastifikátoru Den Braven nejprve tlakové pevnosti při množství 1 g (0,8 %) plastifikační přísady ve zkušební směsi výrazně klesly oproti tlakovým pevnostem zkušebních tělísek bez plastifikátoru, ale s dalším větším množstvím plastifikační přísady se tlakové pevnosti zkušebních tělísek zvyšovaly a z pohledu tlakových pevností se tento plastifikátor projevil dokonce jako druhý nejlepší, protože při přidání 6 g (5 %) plastifikátoru do směsi se pevnosti v tlaku zvýšily až na úroveň 91,25 MPa.

### 3.2.5 Porovnání plastifikátorů s třídami cementů

V této kapitole jsem se zabývala příčným řešením předchozího problému, a to prověření působení jednotlivých použitých plastifikátorů vzhledem k účinku na jednotlivé druhy cementů. V každé níže uvedené podkapitole jsem vždy porovnávala jednotlivé tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s jedním z použitých druhů cementů a vždy různým podílem plastifikační přísady s tlakovými pevnostmi zkušebních tělísek vyrobených z dalších použitých druhů cementů.

#### 3.2.5.1 Plastifikátor Den Braven

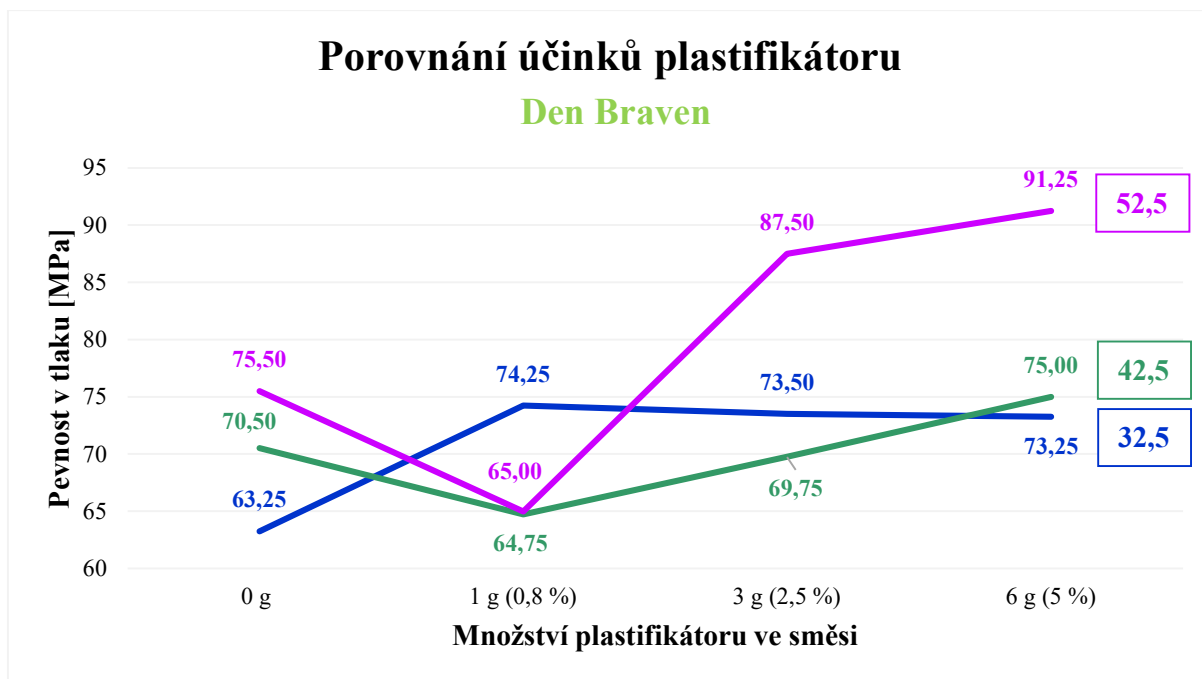
Jako první v této kapitole, kde jsem se jednotlivě zabývala jednotlivými použitými plastifikátory a jejich účinkem na použité pevnostní třídy cementu, jsem porovnávala tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s přidáním různého (postupně zvyšovaném) množství plastifikátoru Den Braven, který se v předchozích kapitolách projevil celkem kladně svými tlakovými pevnostmi. Ony zmíněné tlakové pevnosti jsem mezi sebou jednotlivě porovnávala vzhledem k použité třídě cementu. Naměřené hodnoty z předchozích kapitol jsem uvedla v níže zapsané tabulce č. 25, ze které vychází i následující graf č. 17, abych poté byla schopna je mezi sebou jednotlivě porovnat a vyhodnotit nejučinnější třídu cementu s tímto plastifikátorem, což jsem také následovně provedla.

Tabulka 25: Tlaková pevnosti tělísek s plastifikátorem Den Braven a třídami cementů

Třída cementu	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Množství plastifikátoru ve směsi [g]			
	0	1	3	6
<b>32,5 R</b>	<b>63,25</b>	<b>74,25</b>	<b>73,50</b>	<b>73,25</b>
<b>42,5 R</b>	<b>70,50</b>	<b>64,75</b>	<b>69,75</b>	<b>75,00</b>
<b>52,5 R</b>	<b>75,50</b>	<b>65,00</b>	<b>87,50</b>	<b>91,25</b>

Poznámka: Množství plastifikátoru ve směsi je v tabulce uvedeno v gramech, tedy 1; 3 a 6 g, což je v přepočtu 0,8; 2,5 a 5 % z celkové hmotnosti cementu

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 17: Porovnání účinků plastifikátoru Den Braven ve směsi vzhledem ke třídě cementu

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 17 vychází fakt, že z pohledu tlakových pevností můžeme za nejúčinnější směsi s plastifikátorem Den Braven brát směsi s cementem 52,5 R, díky kterému dosahovaly tlakové pevnosti až hodnoty 96,25 MPa. Na druhou stranu se účinky plastifikační přísady projevily až při vyšším množství plastifikátoru z celkové hmotnosti cementu.

S cementem 32,5 R se tlakové pevnosti zkušebních tělísek zvýšily pouze při množství 1 g (0,8 % z celkové hmotnosti cementu) ve směsi, ale při větším množství plastifikační přísady v namíchané zkušební směsi se začaly pomalu snižovat.

Vyšší tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených z namíchaných směsí s cementem 42,5 R se také začaly projevovat postupně projevovat až s větším podílem plastifikační přísady z celkové hmotnosti cementu.

#### 3.2.5.2 Plastifikátor MC-PowerFlow 2695

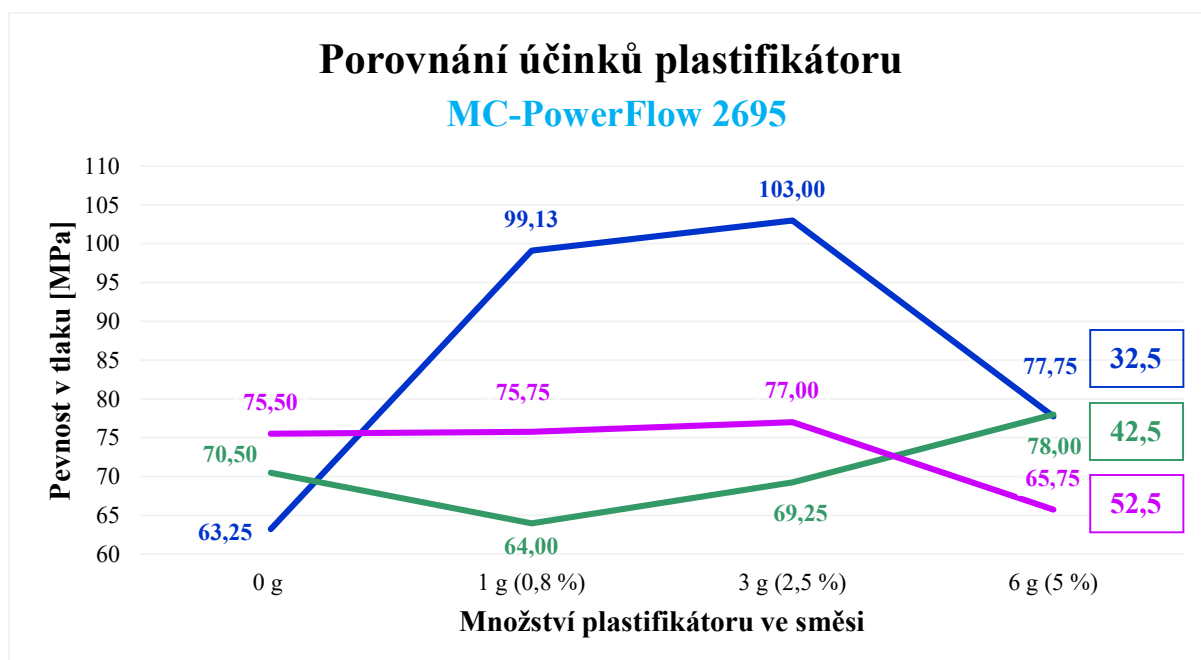
Pro další vyhodnocení nejúčinnější třídy cementu s jednotlivými cementy jsem zvolila plastifikátor MC-PowerFlow 2695, který se mi již v minulých kapitolách osvědčil svými vysokými pevnostmi v tlaku. Získané naměřené hodnoty z předchozích kapitol jsem uvedla v tabulce č. 26, ze které následně vychází i níže uvedený graf č. 18.

Tabulka 26: Tlakové pevnosti tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a třídami cementů

Třída cementu	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Množství plastifikátoru ve směsi [g]			
	0	1	3	6
<b>32,5 R</b>	<b>63,25</b>	<b>99,13</b>	<b>103,00</b>	<b>77,75</b>
<b>42,5 R</b>	<b>70,50</b>	<b>64,00</b>	<b>69,25</b>	<b>78,00</b>
<b>52,5 R</b>	<b>75,50</b>	<b>75,75</b>	<b>77,00</b>	<b>65,75</b>

Poznámka: Množství plastifikátoru ve směsi je v tabulce uvedeno v gramech, tedy 1; 3 a 6 g, což je v přepočtu 0,8; 2,5 a 5 % z celkové hmotnosti cementu

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 18: Porovnání účinků plastifikátoru MC-PowerFlow 2695 ve směsi vzhledem ke třídě cementu

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 18 na první pohled vyplývá fakt, že, co se nejvyšších tlakových pevností týče, za nejúčinnější cement s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 rozhodně můžeme považovat cement 32,5 R, se kterým zkušební tělíska s množstvím 3 g (2,5 %) plastifikátoru dosáhla dokonce tlakové pevnosti 103 MPa, ale při větším množství plastifikační přísady se tlakové pevnosti začaly rapidně snižovat.

Snižování tlakových pevností s postupně přidávaným větším množstvím plastifikační přísady ve výrobní směsi se projevilo i u zkušebních tělísek ze směsi s cementem 52,5 R, ale tlakové pevnosti se nezvýšily v takové míře, jako tomu bylo ve směsích s cementem 32,5 R.

U cementu pevnostní třídy 42,5 R se tlakové pevnosti vyrobených zkušebních tělísek ze směsi s různým a následně postupně zvyšovaným množstvím již zmiňované plastifikační

přísady MC-PowerFlow 2695 začaly nejprve zmenšovat, ale při větším množství plastifikační přísady v namíchané zkušební směsi se začaly pomalu zvyšovat.

### 3.2.5.3 Plastifikátor Murasan BWA 14

Další vyhodnocení nejúčinnější třídy cementu vzhledem k zrovna použité plastifikační přísadě jsem provedla u plastifikátoru Murasan BWA 14, který se v předcházejících kapitolách neprojevil zrovna nejlépe svým účinkem na tlakové pevnosti zkušebních později pevnostně otestovaných tělísek, kde jsem stejně jako v předchozích výše uvedených kapitolách graficky vyhodnotila nejlépe působící třídu cementu s tímto plastifikátorem. Získané potřebné hodnoty tlakových pevností zkušebních tělísek vyrobených právě s touto plastifikační přísadou z předcházejících kapitol, kde jsem se zrovna touto problematikou zabývala, jsem uvedla v následující níže zobrazené tabulce č. 27, ze které vychází i následující graf č. 19, díky kterému jsem mohla jasně vidět postupný průběh tlakových pevností zkušebních tělísek vyrobených z jednotlivých pevnostních tříd cementů vzhledem k postupně zvyšovanému množství přídavku plastifikátoru Murasan BWA 14 a následně vyhodnotit nejvýhodnější kombinaci nejúčinnější třídy cementu a plastifikační přísady.

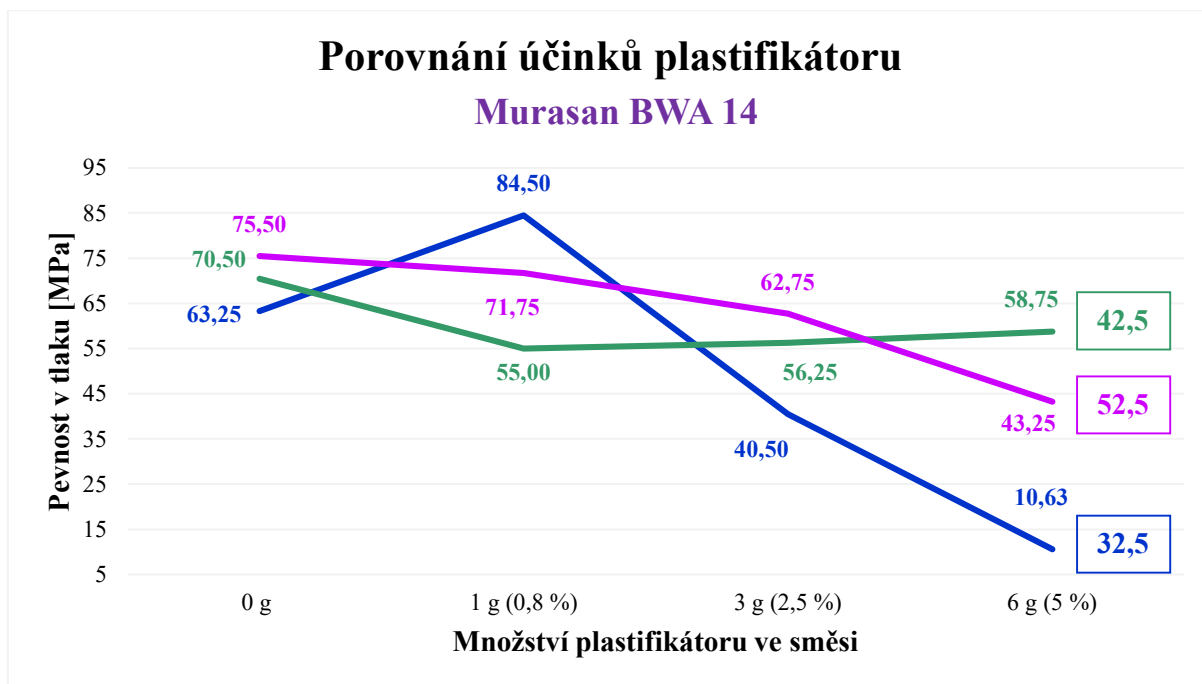
Tabulka 27: Tlakové pevnosti tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a třídami cementů

Třída cementu	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Množství plastifikátoru ve směsi [g]			
	0	1	3	6
<b>32,5 R</b>	<b>63,25</b>	<b>84,50</b>	<b>40,50</b>	<b>10,63</b>
<b>42,5 R</b>	<b>70,50</b>	<b>55,00</b>	<b>56,25</b>	<b>58,75</b>
<b>52,5 R</b>	<b>75,50</b>	<b>71,75</b>	<b>62,75</b>	<b>43,25</b>

Poznámka: Množství plastifikátoru ve směsi je v tabulce uvedeno v gramech, tedy 1; 3 a 6 g, což je v přepočtu 0,8; 2,5 a 5 % z celkové hmotnosti cementu

Zdroj: Vlastní šetření





Graf 19: Porovnání účinků plastifikátoru Murasan BWA 14 ve směsi vzhledem ke třídě cementu

Zdroj: Vlastní šetření

S plastifikátorem Murasan BWA 14 se z pohledu tlakových pevností projevil cement třídy 32,5 R, který při množství 1 g (0,8 %) ve směsi dosáhl hodnoty 84,50 MPa, ale při větším množství téhle plastifikační přísady se tlakové pevnosti snížily až na hodnotu 10,63 MPa. Tento jev je vysvětlen v kapitole č. 3.2.2.3.

Ve směsích s cementem 52,5 R se tlakové pevnosti zkušebních tělísek po celou dobu přidávání plastifikační přísady snižovaly, až se při 6 g (5 %) ve směsi dostaly na hodnotu 43,25 MPa.

U poslední použité třídy cementu, tedy cementu 42,5 R, se nejprve při malém množství plastifikátoru ve směsi pevnosti v tlaku snížily pod hranici tlakových pevností zkušebních tělísek bez plastifikátoru, ale při postupném přidávání většího množství této plastifikační přísady se začaly zase postupně zvyšovat.

#### 3.2.5.4 Plastifikátor Muraplast FK 43

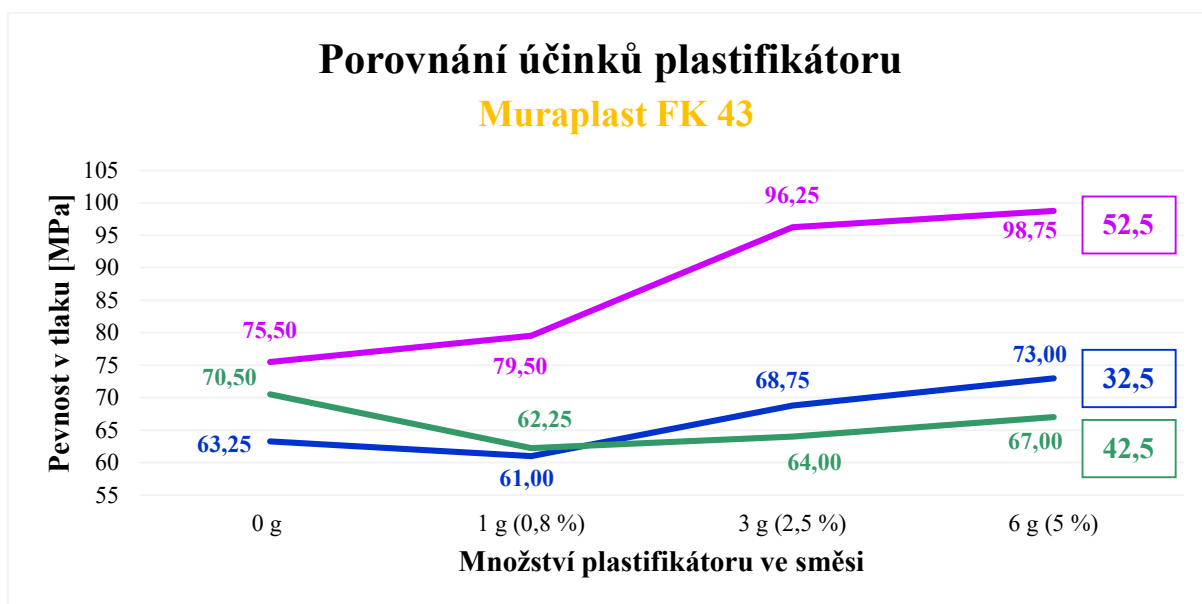
Jako poslední pro porovnání a následné vyhodnocení nejlépe působící třídy cementu jsem použila tlakové pevnosti zkušebních tělísek s přidáním postupně zvyšovaného množství plastifikátoru Muraplast FK 43. Hodnoty potřebné k následujícímu porovnávání jsem uvedla v následující tabulce č. 28, ze které vychází i dále uvedený graf č. 20.

Tabulka 28: Tlaková pevnost tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a třídami cementů

Třída cementu	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Množství plastifikátoru ve směsi [g]			
	0	1	3	6
<b>32,5 R</b>	63,25	61,00	68,75	73,00
<b>42,5 R</b>	70,50	62,25	64,00	67,00
<b>52,5 R</b>	75,50	79,50	96,25	98,75

Poznámka: Množství plastifikátoru ve směsi je v tabulce uvedeno v gramech, tedy 1; 3 a 6 g, což je v přepočtu 0,8; 2,5 a 5 % z celkové hmotnosti cementu

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 20: Porovnání účinků plastifikátoru Muraplast FK 43 ve směsi vzhledem ke třídě cementu

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 20 je jako první patrný fakt, že co se tlakových pevností týče, tak rozhodně nejúčinnější byly směsi s cementem 52,5 R, kdy s postupným zvyšováním podílu plastifikační přísady z celkové hmotnosti cementu se tlakové pevnosti zkušebních tělísek začaly čím dál tím více zvyšovat, až při množství 6 g (5 %) ve směsi dosáhly hodnoty 98,75 MPa.

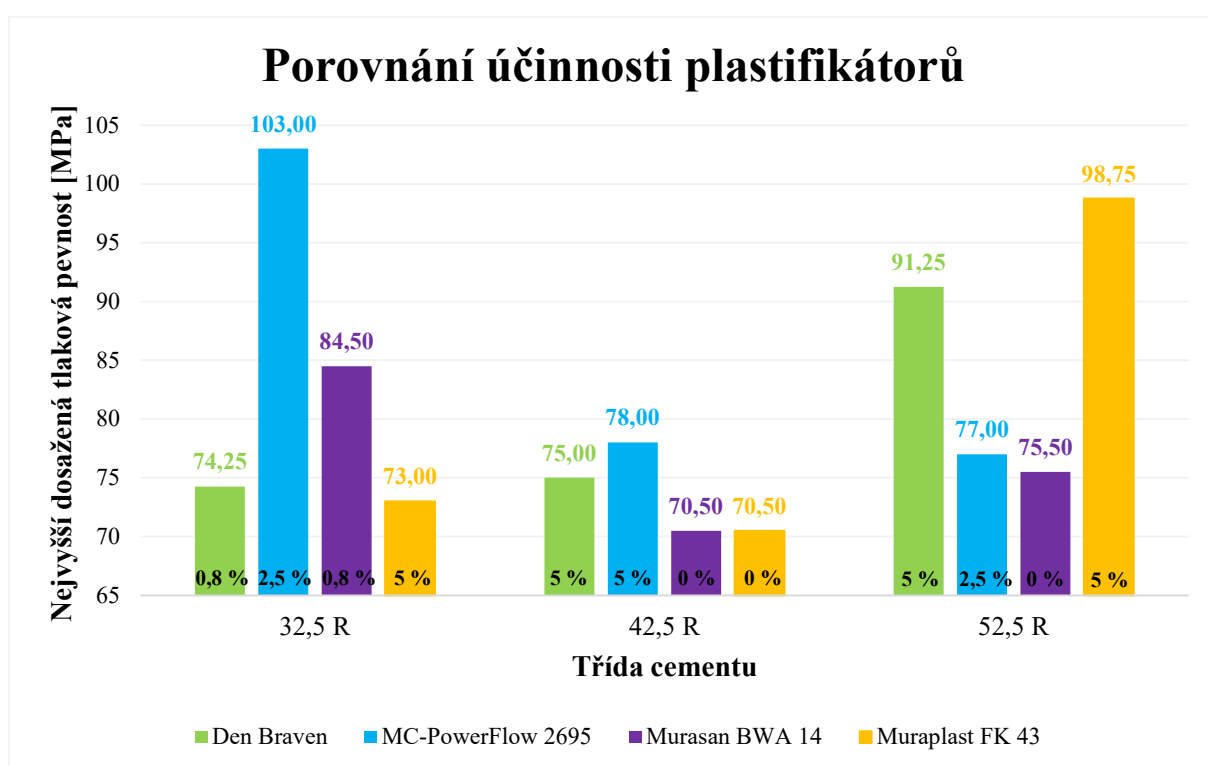
Zkušební tělíska s cementem 32,5 R projevily takové tlakové pevnosti, které se při množství 1 g (0,8 %) ve směsi snížily pod hranici tlakových pevností zkušebních tělísek bez plastifikátoru, ale s postupným přidáváním většího množství plastifikační přísady se postupně začaly zvyšovat.

U zkušebních tělísek s cementem 42,5 R se po přidání plastifikační přísady tlakové pevnosti snížily oproti tlakovým pevnostem tělísek bez plastifikátoru a s větším množstvím

plastifikátoru ve směsi se začaly nepatrně zvyšovat, ale i tak nepřesáhly hranici tlakových pevností tělísek bez plastifikační přísady.

### 3.2.5.5 Porovnání účinnosti plastifikátorů vzhledem ke třídě cementu

Na závěr této kapitoly bych chtěla mezi sebou vyhodnotit jednotlivé plastifikátory a jejich pevnostní účinky vzhledem k použité třídě cementu. Pro porovnání, a tím získání toho nejúčinnějšího plastifikátoru k dané třídě cementu, jsem použila vždy nejvyšší dosaženou tlakovou pevnost zkušebních tělísek vyrobených z jedné třídy cementu a postupně přidávaného množství různého plastifikátoru. Následně jsem použité plastifikátory a jejich pevnostní účinek vzhledem k třídě cementu vyhodnotila dle níže uvedeného grafu č. 21.



Graf 21: Porovnání nejvyšše dosažených tlakových pevností vzhledem ke třídě cementu

Poznámka: V uvedeném grafu je podíl použitých plastifikátorů ve směsi u nejvyšších hodnot dosažených tlakových pevností uveden ve spodní části jednotlivých sloupcových grafů

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 21 si hned na první pohlednutí můžeme všimnout, že s cementem 32,5 R nekompromisně nejlépe reagoval plastifikátor MC-PowerFlow 2695, díky kterému zkušební tělíska dosáhla při množství 2,5 % (3 g) plastifikátoru z celkové navážky cementu tlakové pevnosti až 103 MPa. Jako druhý nejúčinnější plastifikátor s cementem 32,5 R se projevil Murasan BWA 14, který ale zvýšil tlakovou pevnost zkušebních tělísek pouze v množství 1 g (0,8 %) ve směsi, při větším množství se tlakové pevnosti začaly snižovat.

Plastifikátory Den Braven a Muraplast FK 43 sice tlakové pevnosti zkušebních tělísek zvýšily, ale ne v takové míře jako u předchozích plastifikátorů a nelišily se tolik od pevností v tlaku zkušebních tělísek bez plastifikátoru.

U cementu 42,5 R se ukázalo, že je ze všech použitých tříd cementů je nejhůře reagující s přidáním plastifikační přísady, na tlakové pevnosti zkušebních tělísek. V některých případech přidání plastifikátoru jenom sníží tlakové pevnosti zkušebních tělísek bez plastifikátoru. V mém případě tedy nejlépe reagoval s plastifikátorem MC-PowerFlow, kdy zkušební tělíska při množství 5 % (6 g) z celkové hmotnosti cementu dosáhla nejvyšší pevnost v tlaku, a to přesněji 78,00 MPa. U plastifikátoru Den Braven lze vidět, že se tlakové pevnosti zkušebních tělísek zvýšily (a to při množství 5 % z celkové navážky cementu), ale ne s takovým rozdílem od zkušebních tělísek bez plastifikátoru. Tato třída cementu s plastifikátory Murasan BWA 14 a Muraplast FK 43 nereagovala v podstatě vůbec, ba dokonce se tlakové pevnosti ještě snížily, a nejvyššími pevnostmi tlaku zůstaly tlakové pevnosti zkušebních tělísek bez plastifikátoru.

Z grafu je možné hned na první pohled vidět, že s cementem 52,5 R se z pohledu množství účinnosti na velikost tlakových pevností nejlépe projeví plastifikátory Den Braven a Muraplast FK 43. Lépe se tedy projeví plastifikační přísada Muraplast FK 43, díky které zkušební tělíska při množství 5 % (6 g) z celkového množství cementu dosáhla tlakové pevnosti 98,75 MPa. Svými účinky plastifikátor Den Braven zvýšil tlakové pevnosti vyrobených zkušebních tělísek na hodnotu 91,25 MPa, a to při množství 6 g (5 %) ve směsi. Tím pádem můžeme tento plastifikátor vyhodnotit jako druhý nejlépe působící s cementem 52,5 R. Plastifikátor MC-PowerFlow 2695 se překvapivě neprojevil v takové míře jako tomu bylo u předchozích tříd cementů. Sice tlakové pevnosti zkušebních tělísek zvýšil, ale výsledné hodnoty se tolik neliší od tlakových pevností zkušebních tělísek bez plastifikátoru. Poslední plastifikátor Murasan BWA 14 se i s cementem 52,5 R projevil jako nejhorší. Tlakové pevnosti se nezvýšily, tedy nejvyšší získanou hodnotou zůstává tlaková pevnost zkušebních tělísek bez plastifikátoru.

### 3.3 Zkoušky s kavitovanou vodou

Zkoušky s kavitovanou vodou jsem provedla postupně se všemi použitými pevnostními třídami cementu, a to 32,5 R; 42,5 R a 52,5 R, čehož jsem dosáhla tím, že jsem vždy vyrobila nejprve zkušební vzorky 20 x 20 x 20 mm s pitnou kavitovanou vodou a s vodním součinitelem  $w = 0,25$ , poté jsem uskutečnila zkoušky s kavitovanou pitnou vodou, kdy jsem zvýšila vodní součinitel na hodnotu  $w = 0,3$  a nakonec i vyrobila zkušební vzorky s kavitovanou demineralizovanou vodou. Dále jsem u všech těchto vyrobených zkušebních tělísek provedla zkoušku tlakových pevností, kterou jsem nakonec porovnávala se zkouškami tlakových pevností zkušebních tělísek ze směsí s plastifikátory, kterými jsem se zabývala v několika předchozích kapitolách.

#### 3.3.1 Určení nejvyššího výkonu kavitačního přístroje

Poměrně důležitou částí zkoušek a výroby vzorků s kavitovanou vodou bylo určení nejvyššího výkonu stroje, přesněji při jakém povolení výkonnostního šroubu budou později vyrobená zkušební tělíška vykazovat nejvyšší tlakové pevnosti.

Celá zkouška tlakových pevností vzorků začala tím, že jsem si za pomoci digitální váhy odměřila 120 g cementu pevnostní třídy 42,5 R do plastové misky. Následně jsem si nalila přesně 1 l pitné vody do nádrže kavitačního přístroje. Poté jsem pootočila výkonnostní povolovací šroub, který vhání do nádrže vzduch do takové míry, kdy proces kavitace začal fungovat. Tuto fázi jsem pojala za první fázi potočení výkonnostním šroubem. Následně jsem v této fázi výkonu nechala vodu kavitovat po dobu 3 min, což je doba, kterou jsem vzhledem k následujícím kapitolám uznala za nejvhodnější. Tuto zkavitovanou vodu jsem následně odvážíla v hmotnosti 30 g a použila ji jako záměsovou pro výrobu zkušebních vzorků. Tyto dvě složky jsem smíchala pomocí špachtle a nadále za pomoci vibračního stolku dosáhla plastického stavu, kdy jsem byla schopná tuto směs uložit do olejem předem vymazané kovové formy pro vzorky 20 x 20 x 20 mm. Formu jsem naplnila směsí a nechala vibrovat do té doby, dokud se směs nerozlila po celém objemu formy. Poté jsem za pomoci špachtle zarovнала povrch formy do perfektní roviny. Následně jsem v nádrži kavitačního stroje vyměnila již zkavitovanou pitnou vodu za vodu nekavitovanou a tentokrát povolila výkonnostní šroub o jedno půl otočení, tuto fázi jsem brala jako fázi druhou. Zase jsem nechala vodu zkavitovat po dobu 3 min a použila vodu jako záměsovou. Stejným způsobem jsem pokračovala do čtvrté fáze potočení, kdy jsem pokaždé použila vodu po dobu 3 min zkavitovanou jako vodu záměsovou. Ve chvíli, kdy jsem měla naplněné všechny 4 formy směsmi zkušebních vzorků, počkala jsem do dalšího dne, než zkušební tělíška částečně zatuhla a zatvrdla, a jednotlivě je

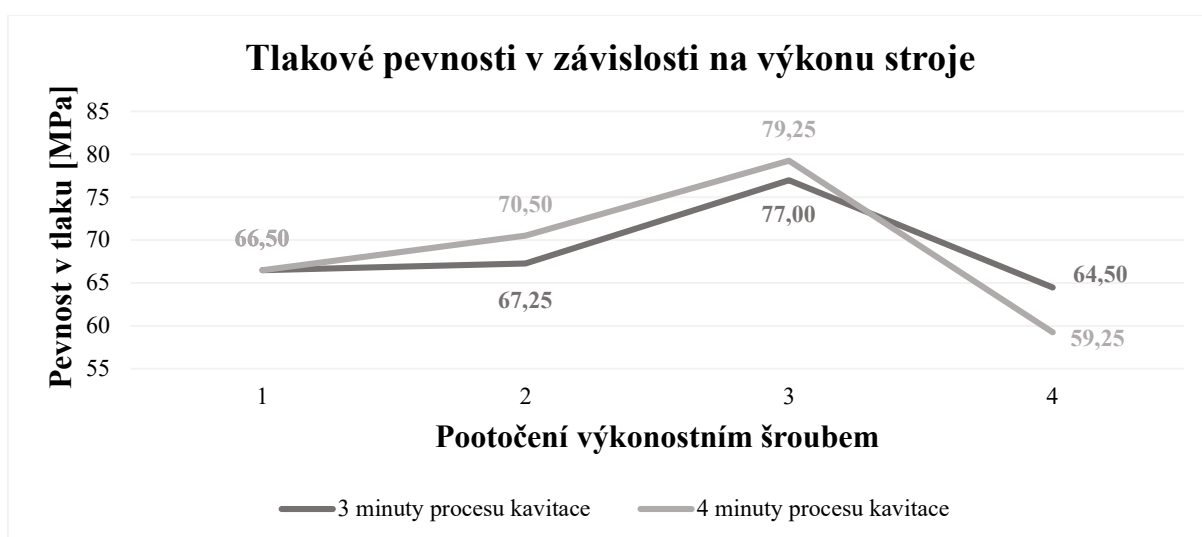
vyjmula z formy. Následně je uložila do vlhkého prostředí a nechala je finálně zatvrdnout při 60 °C po dobu 16 hodin. Díky tomu dosáhly svých konečných tlakových pevností, které jsem zjišťovala v další fázi zkoušky pevností v tlaku za pomoci hydraulického lisu, kde jsem mezi dvě proti sobě působící kovové plochy uložila do osy zkušební tělísko, nechala stroj působit do té doby, dokud se zkušební vzorek nerozdrtil a já nezískala zatěžující sílu. Tuto zkoušku jsem provedla celou ještě jednou s tím rozdílem, že jsem pitnou vodu nechala kavitovat po dobu 4 min, a i tomto případě postupně povolovala výkonnostní šroub.

Získané konečné tlakové pevnosti zkušebních tělísek s kavitovanou vodou po dobu 3 a 4 min a jinými účinky výkonu kavitačního stroje, kterých jsem dosáhla postupným povolováním výkonnostního šroubu, jsem uvedla níže v tabulce č. 29, ze které následně vychází i graf č. 22.

Tabulka 29: Tlakové pevnosti vzhledem k výkonosti stroje

Doba procesu kavitace [min]	Pootočení šroubem	Zatěžující síla [kN]					Pevnost v tlaku [MPa]
		1.	2.	3.	4.	Ø	
3	1	27,8	25,6	26,9	26,1	26,6	<b>66,50</b>
	2	25,2	27,3	26,3	28,9	26,9	<b>67,25</b>
	3	30,4	34,6	29,1	29,1	30,8	<b>77,00</b>
	4	28,3	24,6	25,2	25,2	25,8	<b>64,50</b>
4	1	24,6	27,2	27,2	27,2	26,6	<b>66,50</b>
	2	26,7	28,1	36,1	21,7	28,2	<b>70,50</b>
	3	33,3	32,5	28,2	32,9	31,7	<b>79,25</b>
	4	24,8	24,4	22,0	24,5	23,9	<b>59,75</b>

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 22: Tlakové pevnosti v závislosti na výkonu stroje

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 22 je patrný fakt, že voda je vzhledem k výšce tlakových pevností neúčinnější po třetím půl otočení výkonnostním šroubem od minimálního otočení pro funkčnost kavitace. Po třech minutách kavitačního procesu dosáhla zkušební tělíska tlakové pevnosti 77 MPa a tělíska vyrobená ze směsi s kavitovanou vodou po dobu 4 min dosáhla pevnosti 79,25 MPa.

### **3.3.2 Zkoušky s cementem 32,5 R a kavitovanou vodou**

První určování účinků kavitované vody jsem zkoušela s cementem třídy 32,5 R, u kterého jsem očekávala nejmenší tlakové pevnosti ze všech použitých tříd cementů. Právě pomocí výsledných hodnot tlakových pevností jsem mohla jednotlivé zkoušky účinků kavitované vody mezi sebou porovnat a vyhodnotit neúčinnější variantu kavitované vody. Zmiňované zkoušky jsem vyhodnotila vždy graficky a na konci kapitoly jsou porovnány mezi sebou.

#### **3.3.2.1 Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli $w = 0,25$**

Jako první a zároveň základní zkouškou jsem zvolila zkoušku s kavitovanou pitnou vodou, kterou jsem následně používala jako základní zkoušku pro porovnání různých níže uvedených variant výšky hodnot vodního součinitele. U této zkoušky jsem očekávala nejmenší dosažené hodnoty tlakových pevností vzhledem k hodnotě vodního součinitele v kavitované vodě, protože při úpravě vody kavitací dochází k jejímu sycení plyny z atmosféry, tím se voda okyseluje zejména oxidem uhličitým a dalšími plyny, dochází ke snížení pH až na  $\text{pH} < 5$ , což je hodnota, která není vhodná pro správné tuhnutí a tvrdnutí cementu. Předpokládala jsem, že tento jev ale nemusí být konečný a zkoušela jsem různé doby kavitace, protože jsem si v literatuře zjistila [6], jak je uvedené v úvodu mé práce, že nedochází jen k provzdušnění vody, ale také k destrukci shluků molekul vody, kde jsou molekuly vázány vodíkovými můstky. Totiž deflokulací těchto shluků uniknou samostatné molekuly, které mají jak známo dipól a mohou působit jako plastifikátor (amfifilní tenzidy).

Vzhledem k tomu, že jsem neznala časové závislosti výše uvedených změn, byla jsem nucena zkoušky provádět v určitých časových intervalech, a proto jsem si zvolila 1 min. Poté jsem provedla řadu následujících zkoušek tlakových pevnostních charakteristik vzorků, graficky vyhodnotila průběh kavitace a zjistila časy kavitace, které jsou nejvhodnější pro použití ve výrobě.

Jako zkoušku pro získání hodnot tlakových pevností jsem zvolila opět výrobu zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm, kde jsem tedy místo klasické záměsové vody použila vodu, která prošla již zmiňovaným procesem kavitace. Kavitovanou vodu jsem zkoušela postupně

kavitovat odlišnou dobu, abych našla nejúčinnější dobu procesu kavitace vzhledem k tlakovým pevnostem. Zároveň jsem zkoušela i snížit množství kavitované záměsové vody na takovou hodnotu, aby mnou připravená namíchaná směs byla schopná zamíchání a následného zhutnění. Během prvních zkoušek tlakových pevností jsme následně zjistila, že zkušební vzorky namíchané ze směsí s minimálním množstvím kavitované záměsové vody neprojevují takové tlakové pevnosti jako zkušební tělíska namíchaná s optimálním množstvím záměsové kavitované vody.

Samotná zkouška tlakových pevností zkušebních tělísek celá započala tím, že jsem si pomocí digitální váhy odvážila přesně 120 g cementu třídy 32,5 R do předem připravené menší plastové misky. Poté jsem si odměřila přesně 1 l pitné vody z vodovodního řádu, kterou jsem následně nalila do nádrže kavitačního přístroje, přístroj zapnula a nechala vodu postupně kavitovat po dobu 1; 2; 3; 4; 5; 6 a 10 minut. Vždy po uplynutí každé z této doby kavitace jsem si za pomoci stříčky odměřila do další plastové misky přesně 30 g právě té vody, která prošla kavitačním procesem. Následně jsem odvážených 120 g cementu nasypala do již zkavitované vody. Tyto dvě složky jsem poté pomocí špachtle promíchala. Když se poté u těchto dvou složek vytvořily suché hrudky, tak jsem pomocí vibračního stolku docílila, že se ze suchých hrudek smíchaných složek začala uvolňovat záměsová, předtím nakavitovaná voda a já byla schopna sjednotit všechny složky v jednotnou hmotu. Kovovou formu, kterou jsem předem vymazala olejem, jsem vyplnila namíchanou směsí z jedné poloviny a pomocí vibračního stolku nechala směs převést zpátky do tekutého stavu, aby se namíchaná směs rozprostřela po celém objemu formy. Poté jsem směsí vyplnila i druhou polovinu formy a znovu rozvibrovala, aby se směs rozprostřela i po zbytku formy. Následně jsem špachtlí zarovнала povrch tělísek do úplné roviny. Další den, kdy zkušební tělíska z části zatvrdla, jsem je opatrně vyjmula z formy a uložila do vlhkého prostředí a hydrotermálně upravila při 60 °C na dobu 16 hodin, díky čemuž dosáhla konečné fáze tuhnutí a tvrdnutí a také díky tomu dosáhla svých konečných tlakových pevností, které jsem potřebovala pro následující zkoušku pevností v tlaku. Právě tuto zkoušku jsem provedla potom, co jsem nechala vzorky vysušit po dobu 4 hodin při 60 °C. Tlakové pevnosti jsem následně vyhodnotila pomocí hydraulického lisu, kde jsem mezi dvě proti sobě působící kovové plochy uložila na osy vždy jedno zkušební tělísko, nechala stroj působit do té doby, kdy se tělísko nezačalo deformovat a já nezískala zatěžující sílu potřebnou pro určení výsledné tlakové pevnosti vzorku, kterou jsem takto zkoumala i u všech následujících zkušebních tělísek.



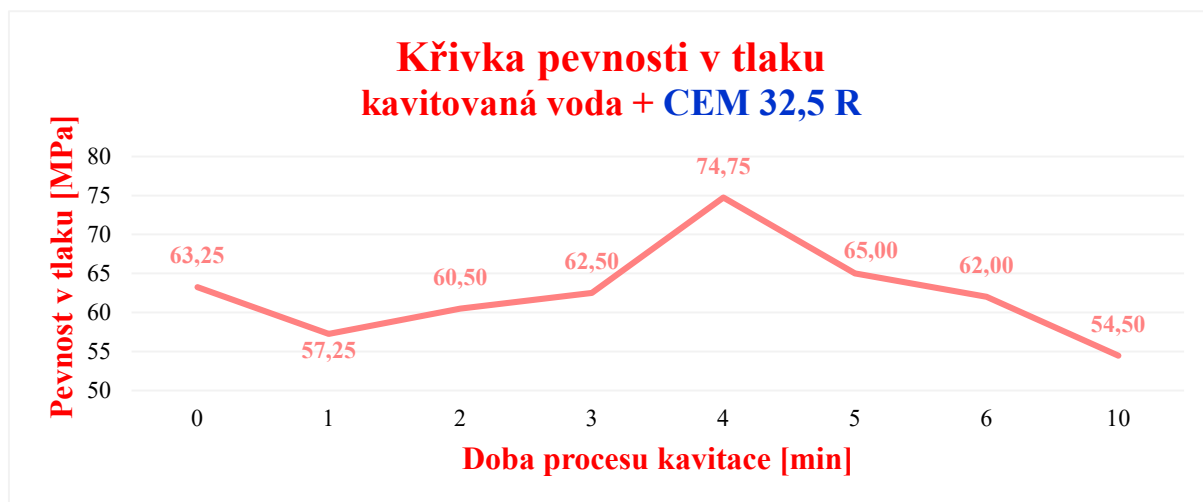
Konečné získané hodnoty tlakových pevností zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s kavítovanou pitnou vodou s hodnotou vodního součinitele ve výši 0,25 jsem uvedla níže v tabulce č. 30 a tyto hodnoty i použila jako poklad pro sestrojenému grafu č. 23.

Tabulka 30: Pevnosti v tlaku tělísek s kavítovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R,  $w = 0,25$

Složky směsi [g]		Doba procesu kavítace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	30	0	-	-	25,3	400	<b>63,25</b>
		1	25,3	20,4	22,9		<b>57,25</b>
		2	26,5	21,8	24,2		<b>60,50</b>
		3	25,0	25,0	25,0		<b>62,50</b>
		4	34,0	25,8	29,9		<b>74,75</b>
		5	27,5	24,5	26,0		<b>65,00</b>
		6	24,5	25,0	24,8		<b>62,00</b>
		10	20,5	23,0	21,8		<b>54,50</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez procesu kavítace byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 23: Pevnost v tlaku vzorků s kavítovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R,  $w = 0,25$

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.2.2 Zkouška s kavítovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli $w = 0,3$

Použiji vodní součinitel pro vhodnou zpracovatelnost zkušební směsi v hodnotě 0,3. Tuto zkoušku jsem provedla za účelem otestování, zdali v předchozí kapitole nebylo množství záměšové vody natolik malé, aby se všechna cementová zrna neobalila záměšovou vodou a následně nebyly tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyšší.

Samotná zkouška tlakových pevností probíhala na stejném principu jako zkouška s kavítovanou pitnou vodou, která byla ve zkušebních směsích v množství vodního součinitele

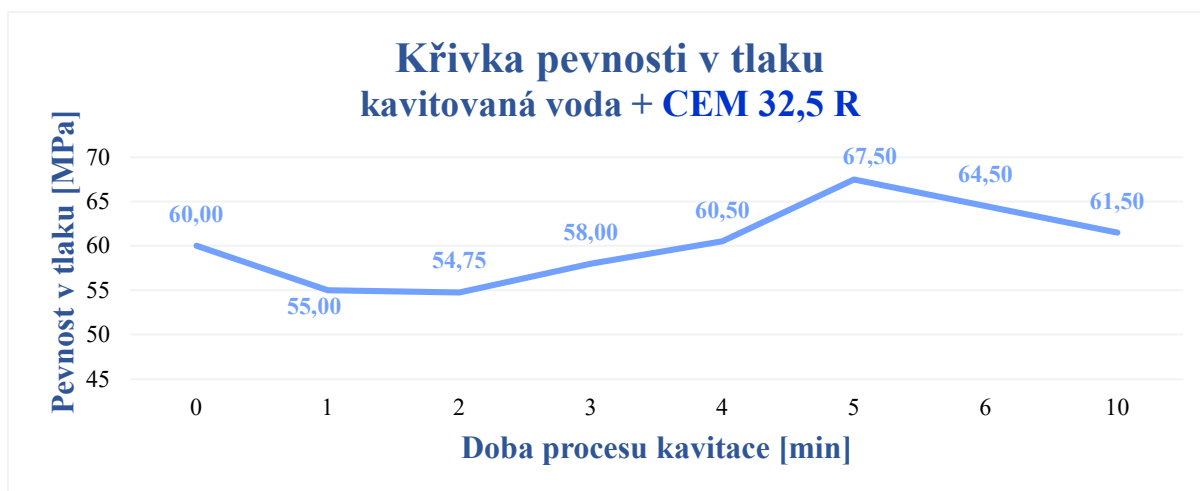
0,25, s tím rozdílem, že jsem do jednotlivých směsí vyrobených s různě dlouho kavitovaných vod přidávala do směsi 36 g zkavitované vody, což odpovídá hodnotě vodního součinitele 0,3.

Získané naměřené a spočítané hodnoty tlakových pevností vzorků s kavitovanou vodou v hodnotě vodního součinitele 0,3 jsem uvedla v tabulce č. 31, ze které vychází následující graf č. 24, který jsem používala i pro následné porovnávání výsledků.

Tabulka 31: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R, w = 0,3

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	30	0	24,0	24,0	24,0	400	<b>60,00</b>
		1	22,5	21,5	22,0		<b>55,00</b>
		2	22,0	21,8	21,9		<b>54,75</b>
		3	23,4	23,0	23,2		<b>58,00</b>
		4	24,6	23,8	24,2		<b>60,50</b>
		5	26,0	28,0	27,0		<b>67,50</b>
		6	26,8	24,7	25,8		<b>64,50</b>
		10	24,0	25,4	24,6		<b>61,50</b>

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 24: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R, w = 0,3

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.2.3 Zkouška s kavitovanou demineralizovanou vodou

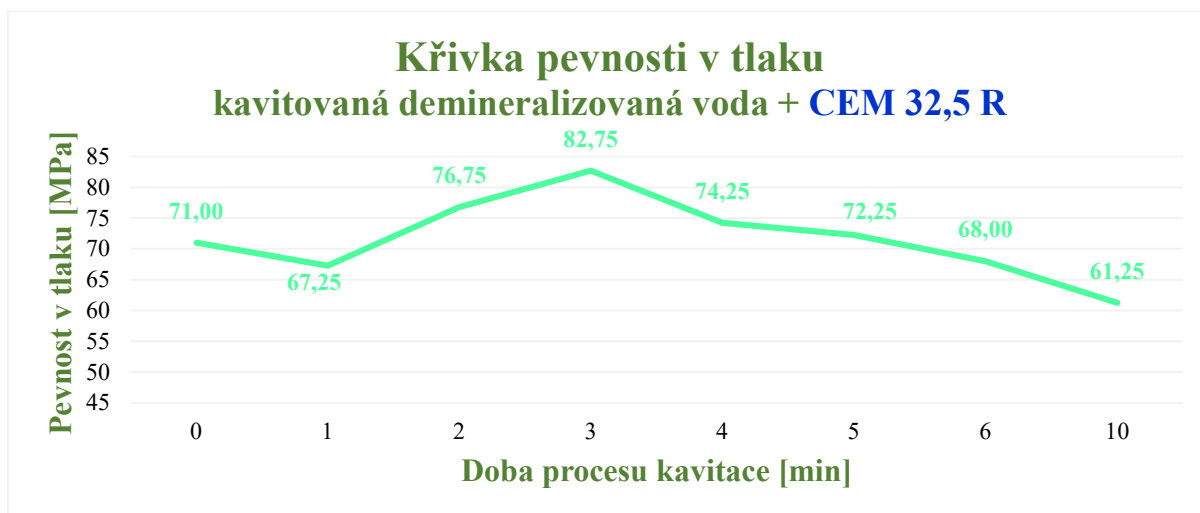
Jednou ze zkoušek, kterou jsem chtěla provést s kavitovanou vodou, byla zkouška s vodou demineralizovanou. I tato zkouška probíhala na stejném principu jako u předcházejících tlakových zkoušek s kavitovanou vodou, jen jsem v tomto případě nechala projít kavitačním procesem vodu demineralizovanou a následně ji do směsi přidala v množství vodního součinitele 0,25, tedy 30 g.

Získané hodnoty, se kterými jsem pokračovala v dalším určování tlakových pevností, jsem uvedla v tabulce č. 32, ze které vychází i graf č. 25.

Tabulka 32: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 32,5 R

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	30	0	28,6	28,1	28,4	400	<b>71,00</b>
		1	26,3	27,5	26,9		<b>67,25</b>
		2	27,5	33,8	30,7		<b>76,75</b>
		3	31,2	35,0	33,1		<b>82,75</b>
		4	30,3	29,0	29,7		<b>74,25</b>
		5	27,9	29,9	28,9		<b>72,25</b>
		6	26,2	28,2	27,2		<b>68,00</b>
		10	25,4	23,5	24,5		<b>61,25</b>

Zdroj: Vlastní šetření

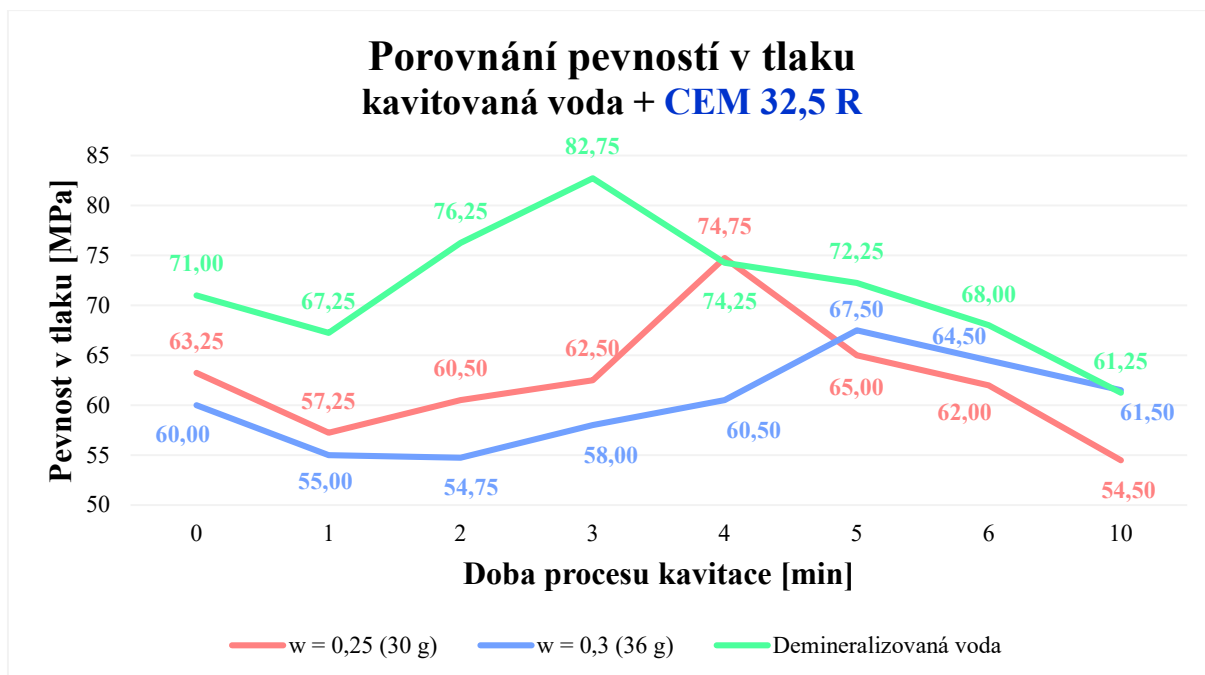


Graf 25: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.2.4 Porovnání tlakových pevností s kavitovanou vodou a CEM 32,5 R

Nakonec této kapitoly s cementem třídy 32,5 R a kavitovanou záměsovou vodou jsem mezi sebou graficky vyhodnotila dosažené tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s kavitovanou pitnou vodou ve výši 30 g ve směsi, což odpovídá hodnotě vodního součinitele 0,25, směsi s kavitovanou vodou v hodnotě vodního součinitele 0,3, tedy 36 g a nakonec i s kavitovanou demineralizovanou vodou ve výši 30 g ve směsi, kdy proces kavitace probíhal vždy po určitou dobu, tedy po 1; 2; 3; 4; 5; 6 a 10 minutách.



Graf 26: Porovnání pevností v tlaku s kavitovanou vodou a CEM 32,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 26 je na první pohled jasně vidět, že zkušební tělíska vyrobená ze směsi s 30 g kavitované demineralizované vody mají jednoznačně vyšší nejvýše dosažené tlakové pevnosti, než zkušební tělíska vyrobená ze směsi s 36 g a 30 g kavitované pitné vody, a to přesně že dosáhla tato zkušební tělíska tlakové pevnosti 82,75 MPa. Jasně zřetelný je i dost podobný průběh křivek znázorňující tlakové pevnosti v závislosti na době procesu kavitace. Přesněji všechny křivky mají prvotní spád tlakových pevností odůvodněný nasycením vody atmosférickými plyny (především oxidem uhličitým), které vedly ke snížení pH vody na hodnotu  $<5$ , což je hodnota, která není vhodná pro použití vody jako záměsové, a tím se tlakové pevnosti snížily. Následně poté ve všech případech došlo k nárůstu tlakových pevností, až tlakové pevnosti nedosáhly svého hodnotního maxima. V případě zkušebních tělísek s 30 g ( $w = 0,25$ ) kavitované pitné vody tento jev přišel ve 4. minutě, kdežto u vzorků s 36 g ( $w = 0,3$ ) kavitované vody až v minutě 5 a u zkušebních vzorků s demineralizovanou vodou k tomuto maximu tlakových pevností dospěly vzorky již ve 3. minutě procesu kavitace. Stejný byl následně i náhlý spád tlakových pevností zapříčiněný pórovitým cementovým tmelem, který vznikl za pomoci kavitačních mikro bublin, a tím pádem se začaly tlakové pevnosti snižovat.

### 3.3.3 Zkoušky s cementem 42,5 R a kavitovanou vodou

Jako druhou zkoušku s kavitovanou vodou jsem zvolila jednotlivé zkoušky s cementem 42,5 R, kdy jsem také zjišťovala nárůst tlakových pevností vzhledem k době procesu kavitace. Samotné tlakové pevnosti jsem zjišťovala na stejném principu jako tlakové pevnosti ostatních zkušebních tělísek s plastifikačními přísadami, které jsem na konci této práce mezi sebou konfrontovala a vyhodnotila nejlépe účinnou fázi kavitované vody.

#### 3.3.3.1 Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli $w = 0,25$

Další a také první zkouškou s cementem 42,5 R byla výroba zkušebních tělísek 20 x 20 x 20 mm ze směsi s cementem 42,5 R a kavitovanou vodou z vodovodního řadu ve výši vodního součinitele 0,25. Samotnou zkoušku pevností v tlaku vzorků jsem prováděla stejným způsobem jako s cementem 32,5 R (viz. kapitola 3.3.2.1).

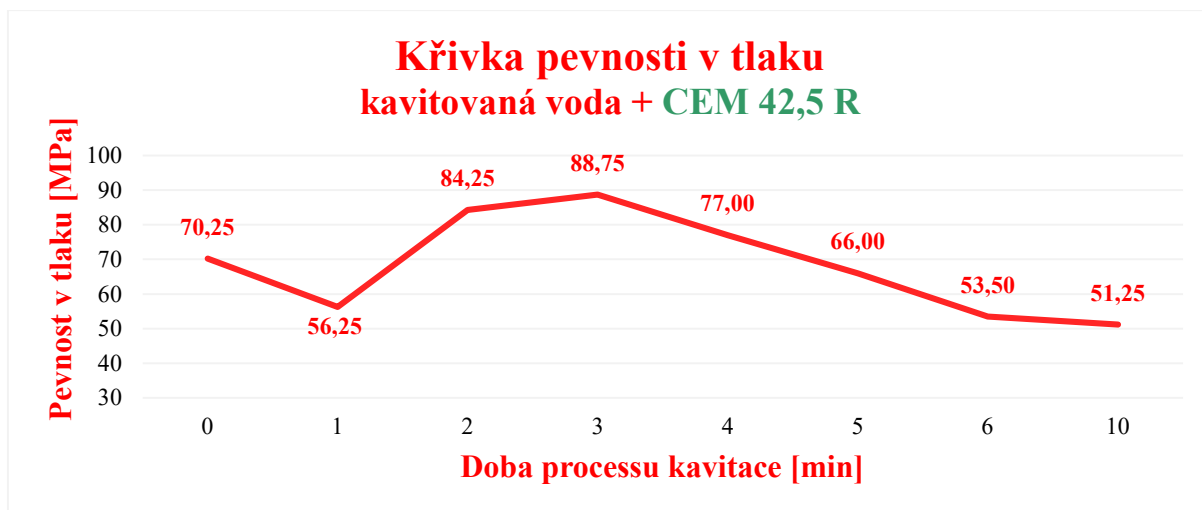
Naměřené a následně spočítané hodnoty tlakových pevností jsem uvedla níže v tabulce č. 33, ze které jsem vycházela i v grafickém zobrazení v následujícím grafu č. 27.

Tabulka 33: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R;  $w = 0,25$

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	30	0	27,8	28,3	28,1	400	<b>70,25</b>
		1	21,8	23,5	22,7		<b>56,75</b>
		2	36,5	32,5	32,0		<b>84,25</b>
		3	39,0	32,0	35,5		<b>88,75</b>
		4	33,4	28,2	30,8		<b>77,00</b>
		5	22,5	26,2	30,8		<b>66,00</b>
		6	20,0	20,6	23,5		<b>53,50</b>
		10	20,4	21,4	19,7		<b>51,25</b>

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez procesu kavitace byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 27: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R,  $w = 0,25$

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.3.2 Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,3

Ačkoliv tlakové pevnosti zkušebních tělísek s kavitovanou vodou z vodovodního řadu byly znatelně vyšší než tlakové pevnosti vzorků s vodou nekavitovanou, chtěla jsem vyzkoušet, zdali by vyšší podíl kavitované vody (respektive množství 36 g ve směsi, což odpovídá vodnímu součiniteli 0,3) nepříčinil ještě vyšší tlakové pevnosti zkušebních tělísek a pravděpodobně tím zabránil prudkému poklesu tlakových pevností při 1. minutě kavitačního procesu.

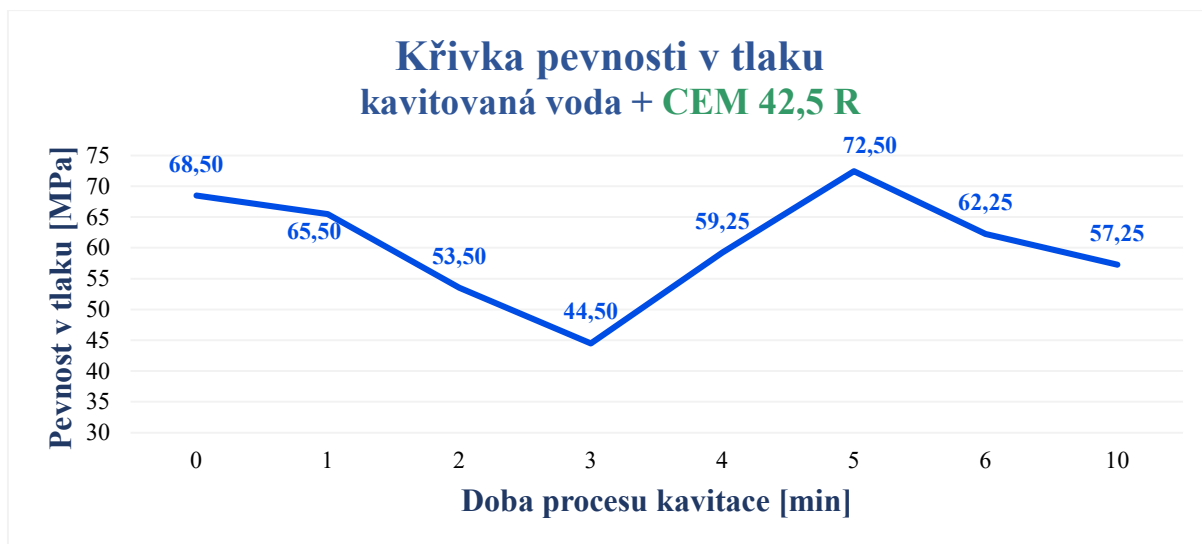
Celé měření probíhalo stanovením pevností v tlaku zkušebních vzorků jako u předchozích zkoušek s pomocí hydraulického lisu, ze kterého jsem získala potřebné hodnoty pro následující určení tlakových pevností.

Získané naměřené hodnoty tlakových pevností vyrobených zkušebních tělísek jsem uvedla níže v tabulce č. 34, ze které vychází i následující graf č. 28.

Tabulka 34: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R;  $w = 0,3$

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	36	0	26,4	28,4	27,4	400	<b>68,50</b>
		1	26,4	25,9	26,2		<b>65,50</b>
		2	23,6	19,2	21,4		<b>53,50</b>
		3	19,2	16,3	17,8		<b>44,50</b>
		4	22,8	24,6	23,7		<b>59,25</b>
		5	27,8	30,1	29,0		<b>72,50</b>
		6	21,3	28,4	24,9		<b>62,25</b>
		10	23,9	21,9	22,9		<b>57,25</b>

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 28: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R,  $w = 0,3$

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.3.3 Zkouška s kavitovanou demineralizovanou vodou

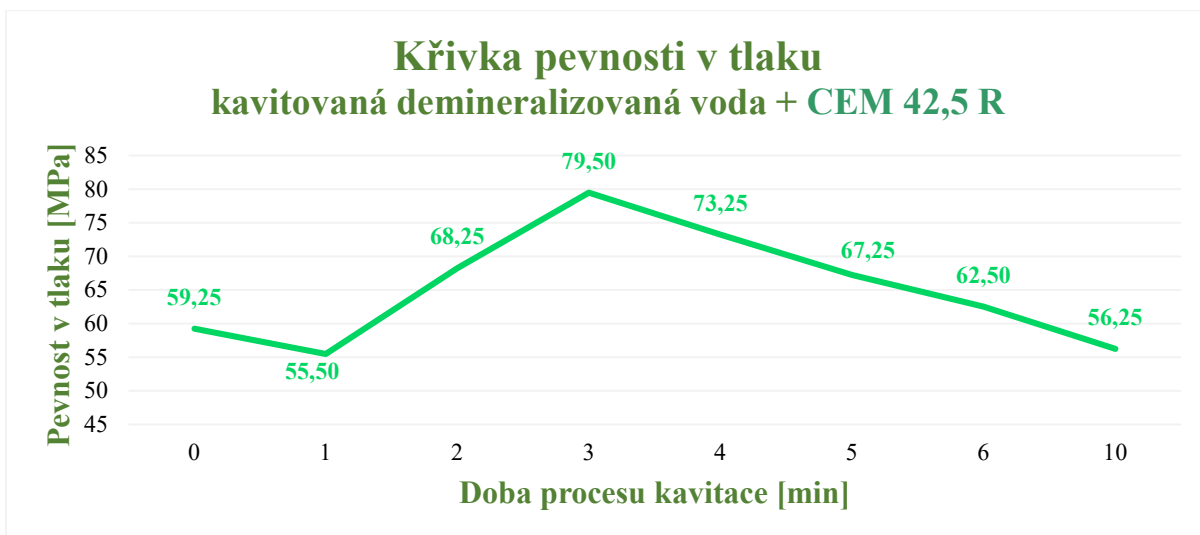
V této kapitole jsem se také rozhodla jako v předchozích kapitolách pro zkoušku s demineralizovanou vodou a v tomto případě s cementem 42,5 R. U samotné zkoušky tlakových pevností zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s 30 g kavitované demineralizované vody a cementem pevnostní třídy 42,5 R jsem postupovala stejně jako v předchozích případech.

Hodnoty, které jsem díky zkoušce tlakových pevností získala, jsem uvedla níže v tabulce č. 35, ze které následně vychází i graf č. 29.

Tabulka 35: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 42,5 R

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	30	0	23,0	24,4	23,7	400	<b>59,25</b>
		1	20,4	24,0	22,2		<b>55,50</b>
		2	26,4	28,2	27,3		<b>68,25</b>
		3	26,4	37,1	31,8		<b>79,50</b>
		4	29,8	28,7	29,3		<b>73,25</b>
		5	26,4	27,4	26,9		<b>67,25</b>
		6	28,9	21,0	25,0		<b>62,50</b>
		10	23,2	21,7	22,5		<b>56,25</b>

Zdroj: Vlastní šetření

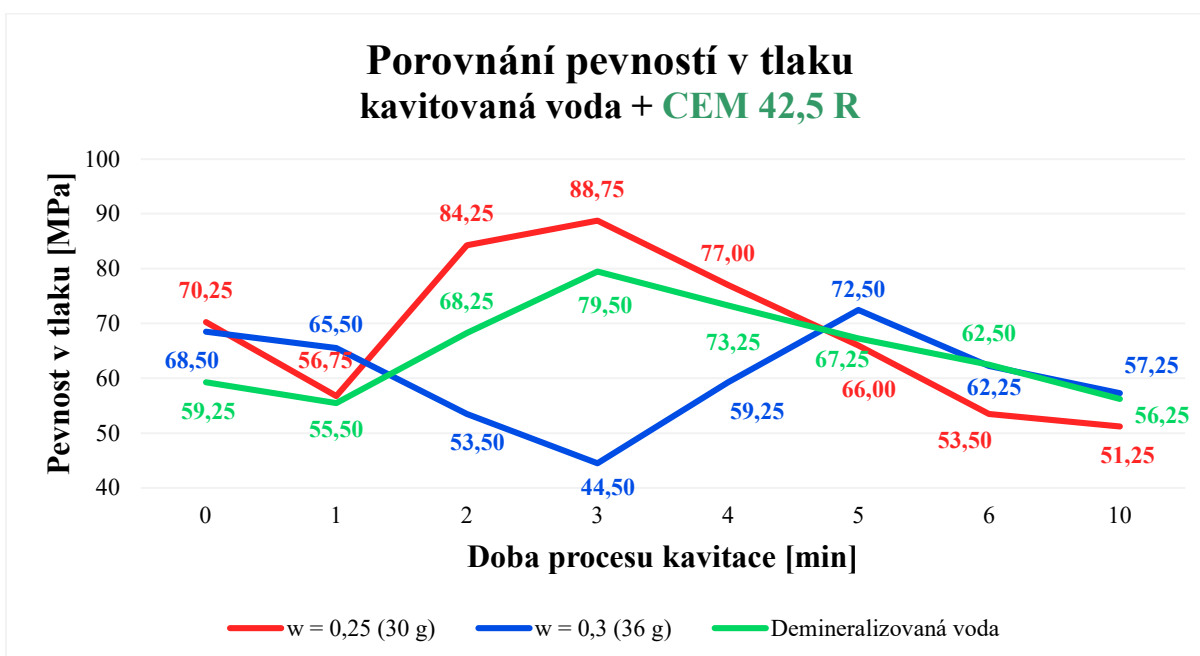


Graf 29: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

#### 3.3.3.4 Porovnání tlakových pevností s kavitovanou vodou a CEM 42,5 R

V této podkapitole jsem se rozhodla také mezi sebou porovnat tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s kavitovanou pitnou vodou, kterou jsem navázila v takovém množství, že hodnota vodního součinitele se rovnala 0,25, a zkušebních vzorků, kde se hodnota vodního součinitele v tomto případě rovnala 0,3. Tyto tlakové pevnosti zkušebních vzorků jsem vyhodnotila za pomoci následujícího grafického zobrazení v grafu č. 30.



Graf 30: Porovnání pevností v tlaku s kavitovanou vodou a CEM 42,5 R

Zdroj: Vlastní šetření



Z výše uvedeného grafu č. 30, který nám zobrazuje porovnání mezi tlakovými pevnostmi zkušebních tělísek s kavitovanou vodou ve směsích ve vodním součiniteli 0,25, což odpovídá 30 g záměsové zkavitované vody ve směsi, tlakovými pevnostmi zkušebních vzorků s kavitovanou pitnou vodou ve směsi ve vodním součiniteli 0,3, a to v tomto případě odpovídá 36 g kavitované vody ve směsi a zkušebních tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou. Je jasně vidět, že zkušební tělíska s 30 g záměsové kavitované vody ve směsi dosahují jednoznačně vyšších tlakových pevností, a to přesněji 88,75 MPa. Této pevnosti v tlaku také dosáhly poměrně dříve než zkušební vzorky s 36 g kavitované vody, přesněji tohoto maxima dosáhly při 3 minutách procesu kavitace, v tomto momentu dosáhly pevnostního maxima také vzorky s kavitovanou demineralizovanou vodou (79,50 MPa), kdežto tlakové pevnosti zkušebních tělísek s 36 g zkavitované vody, což odpovídá vodnímu součiniteli 0,3, svého hodnotního maxima dosáhly až při 5 minutách kavitačního procesu, a to pouze hodnoty 72,50 MPa. I u této pevnostní třídy cementu je zřejmý stejný postup tlakových pevností, a to tedy prvotní spád (u vzorků s 36 g kavitované pitné vody až 3. minutě kavitačního procesu) díky nasycení atmosférickými plyny, nárůst pevností do svého maxima (odůvodnění viz obr. 7) a následný spád tlakových pevností zapříčiněný přesycením kavitované vody mikro bublinami, což vedlo k pórovitosti cementového tmele a tím došlo ke snížení tlakových pevností zkušebních vzorků.

### **3.3.4 Zkoušky s cementem 52,5 R a kavitovanou vodou**

Poslední zkoušky, které jsem uskutečnila s kavitovanou vodou, jsem provedla s třídou cementu 52,5 R, který se mi již v předchozích zkouškách kladně projevil svými vyššími tlakovými pevnostmi. Získané tlakové pevnosti zkušebních vzorků s kavitovanou pitnou vodou, nejprve v množství vodního součinitele 0,29 a poté v hodnotě 0,33, jsem na konci této kapitoly společně se vzorky s kavitovanou demineralizovanou vodou mezi sebou porovnála a následně je i porovnála s tlakovými pevnostmi zkušebních tělísek vyrobených ze směsí s plastifikačními přísadami a tím zobrazila účinnost kavitované vody na tlakové pevnosti kompozitů.

#### **3.3.4.1 Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,29**

Jako první jsem uskutečnila jako základní zkoušku právě zkoušku s kavitovanou pitnou vodou, kterou jsem nadávkovala do zkušebních směsí tak, že hodnota vodního součinitele byla 0,29, což v tomto případě činilo 35 g kavitované vody, kterou jsem nechala projít procesem kavitace po úsecích 1; 2; 3; 4; 5; 6 a 10 minutách, kterou jsem poté použila jako záměsovou

vodu do směsí na výrobu zkušebních tělísek, na kterých jsem následně prováděla zkoušku tlakových pevností.

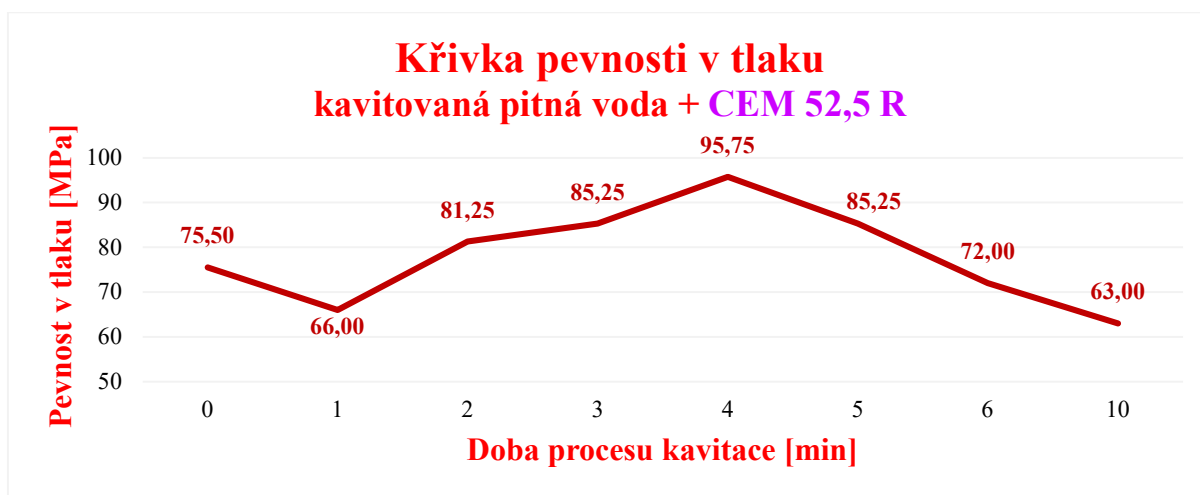
Zjištěné naměřené a následně početně určené pevnosti v tlaku jsem uvedla níže v tabulce č. 36, kterou jsem následně graficky zobrazila v grafu č. 31.

Tabulka 36: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R;  $w = 0,29$

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	35	0	-	-	30,2	400	75,50
		1	26,4	26,4	26,4		66,00
		2	33,4	31,6	32,5		81,25
		3	35,4	32,8	34,1		85,25
		4	39,7	36,8	38,3		95,75
		5	35,2	33,0	34,1		85,25
		6	28,7	28,9	28,8		72,00
		10	27,4	23,0	25,2		63,00

Poznámka: Hodnota tlakových pevností vzorku bez procesu kavitace byla použita tabulky č. 12

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 31: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R,  $w = 0,29$

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.4.2 Zkouška s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,33

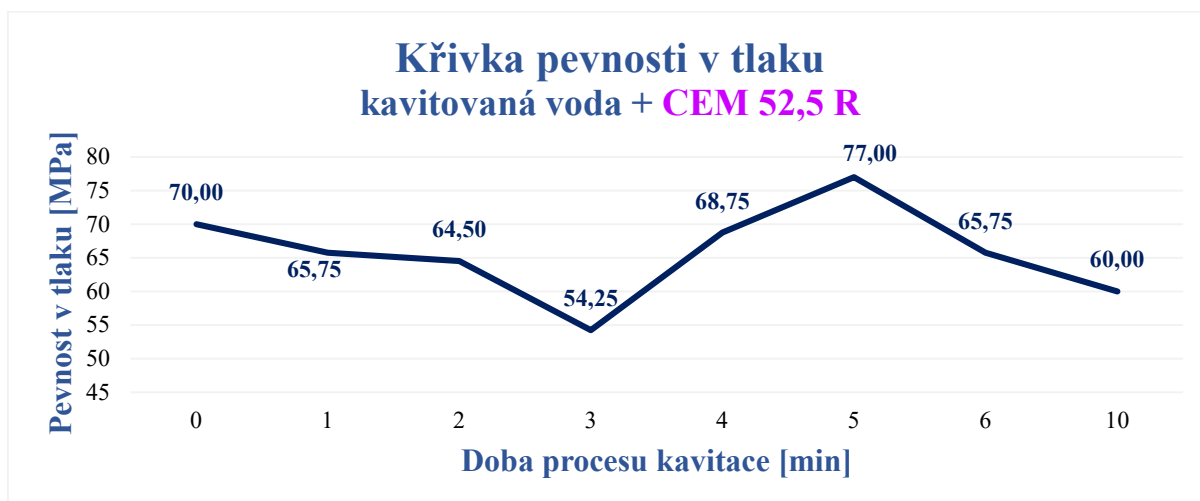
Jako u předchozích pevnostních tříd cementů jsem se i u těchto zkoušek s cementem 52,5 R nevyhnula právě zkoušce tlakových pevností tělísek vyrobených ze směsí s kavitovanou pitnou vodou ve větším množství. Vzhledem k většímu měrnému povrchu se hodnota vodního součinitele vyšplhala na hodnotu 0,33, což v přepočtu na gramy činilo 40 g kavitované pitné vody.

Tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s kavitovanou pitnou vodou ve vodním součiniteli 0,33 jsem uvedla níže v tabulce č. 37 a hodnoty tlakových pevností zkušebních tělísek použila jako výchozí pro graf č. 32, na kterém jsem viděla i chování tohoto systému po různou dobu kavitování.

Tabulka 37: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R; w = 0,33

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	35	0	25,0	31,0	28,0	400	<b>70,00</b>
		1	26,0	26,5	26,3		<b>65,75</b>
		2	26,0	25,5	25,8		<b>64,50</b>
		3	22,8	20,5	21,7		<b>54,25</b>
		4	27,5	27,5	27,5		<b>68,75</b>
		5	29,0	32,5	30,8		<b>77,00</b>
		6	26,0	26,5	26,3		<b>65,75</b>
		10	25,4	22,6	24,0		<b>60,00</b>

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 32: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R, w = 0,33

Zdroj: Vlastní šetření

### 3.3.4.3 Zkouška s kavitovanou demineralizovanou vodou

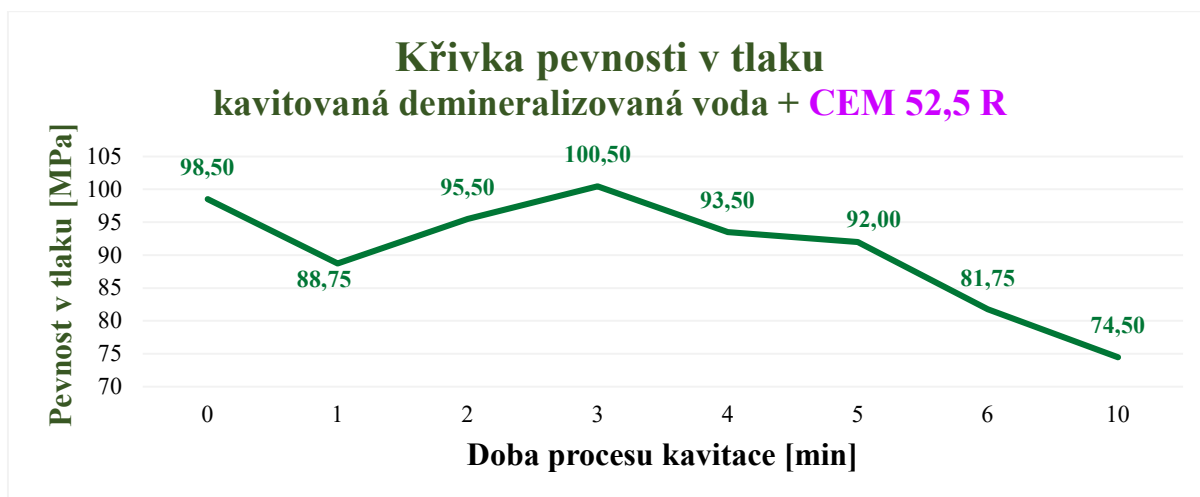
Jako poslední druh vody, který jsem nechala projít kavitačním procesem, byla voda demineralizovaná. Následně jsem ji v množství 36 g (odpovídající vodnímu součiniteli 0,29) přidala do směsi s cementem pevnostní třídy 52,5 R. Na těchto zkušebních těliscích jsem následně prováděla tlakovou pevnostní zkoušku za pomoci hydraulického lisu, díky kterému jsem získala potřebné tlakové pevnosti.

Tlakové pevnosti zkušebních tělísek jsem uvedla níže v tabulce č. 38, ze které následně vychází i grafické vyobrazení v podobě grafu č. 33.

Tabulka 38: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 52,5 R

Složky směsi [g]		Doba procesu kavitace [min]	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda		1.	2.	Ø		
120	35	0	37,5	41,3	39,4	400	<b>98,50</b>
		1	35,5	35,5	35,5		<b>88,75</b>
		2	37,5	38,5	38,0		<b>95,50</b>
		3	40,0	40,3	40,2		<b>100,50</b>
		4	38,3	36,5	37,4		<b>93,50</b>
		5	35,3	38,3	36,8		<b>92,00</b>
		6	33,5	31,8	32,7		<b>81,75</b>
		10	32,5	27,0	29,8		<b>74,50</b>

Zdroj: Vlastní šetření

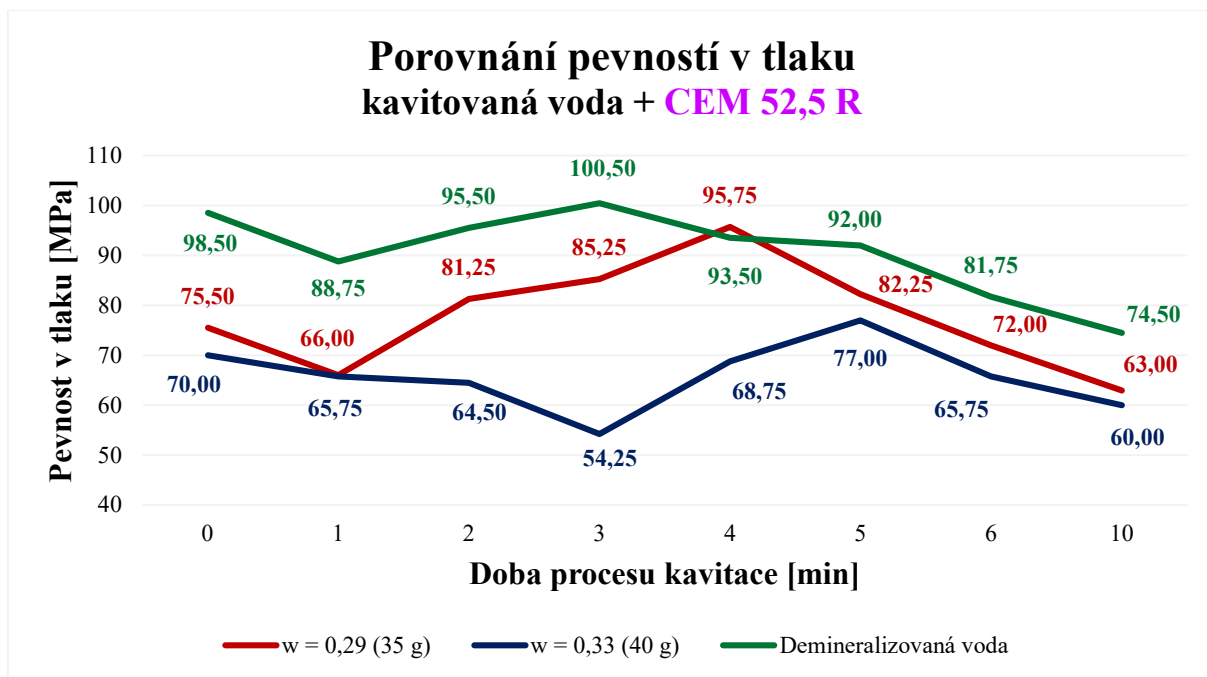


Graf 33: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

#### 3.3.4.4 Porovnání tlakových pevností s kavitovanou vodou a CEM 52,5 R

V této kapitole jsem chtěla stejně jako i u předcházejících tříd cementů mezi sebou porovnat tlakové pevnosti zkušebních tělísek vyrobených ze směsí s kavitovanou pitnou vodou v takovém množství, že hodnota vodního součinitele byla rovna 0,29 (35 g) a zkušebními vzorky s kavitovanou pitnou vodou v tomto případě ve vodním součiniteli 0,33 (40 g), jejichž tlakovými pevnostmi jsem se zabývala ve výše uvedených kapitolách. Graficky jsem toto porovnání uvedla níže v grafu č. 34.



Graf 34: Porovnání pevností v tlaku s kavitovanou vodou a CEM 52,5 R

Zdroj: Vlastní šetření

Z grafu č. 34, kde jsem mezi sebou jako u předešlých pevnostních tříd cementů porovnávala křivky z jednotlivých podkapitol této kapitoly, je patrných několik zjevných informací. Jako první je jasný fakt, že tlakové pevnosti vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou jsou vyšší než tlakové pevnosti zkušebních vzorků s kavitovanou pitnou vodou, přesněji dosáhly maximální tlakové pevnosti, které dosáhly při 3 minutách kavitace, a to 100,50 MPa. Hodnotního maxima dosáhla tělíska vyrobená ze směsi s 40 g kavitované vody až při 5. minutě, kde maximum dosáhlo hodnoty pouze 77,00 MPa a vzorky s 35 g kavitované vody dosáhly maxima ve 4. minutě, a to hodnoty 95,72 MPa. Dalším jasným faktem je stejný průběh všech křivek. Přesněji prvotní spád tlakových pevností, který byl způsoben nasycením plyny z atmosféry, následný nárůst tlakových pevností, dokud nedosáhly svého pevnostního maxima, a nakonec opakovaný spád tlakových pevností.

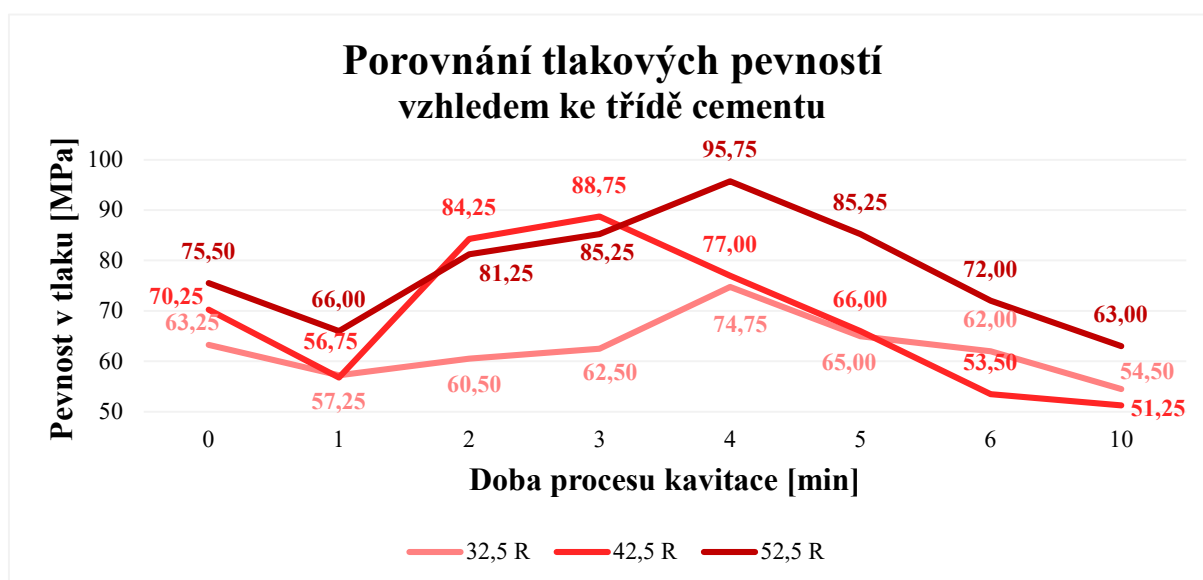
### 3.3.5 Srovnání tlakových pevností vzorků s kavitovanou vodou

V této kapitole jsem mezi sebou porovnávala jednotlivé cementy a jejich účinek s kavitovanou vodou na tlakové pevnosti zkušebních tělísek, zdali podle očekávání bude mít cement třídy 32,5 R nejmenší tlakové pevnosti, a naopak třída cementu 52,5 R zase ty nejvyšší. Nejprve jsem níže vyhodnotila tlakové pevnosti zkušebních tělísek s kavitovanou pitnou vodou ve směsi v množství vodního součinitele 0,25, v případě cementu 52,5 R ve vodním součiniteli 0,29 (v přepočtu ve množství 30 g, v případě cementu 52,5 R ve množství 35 g), následně poté vyhodnotila zkušební tělíska vyrobená ze směsi s množstvím kavitované vody takovém, že

vodní součinitel byl v hodnotě 0,3 v tomto případě cementu 52,5 R ve vodním součiniteli 0,33 (v přepočtu ve množství 35 g, v případě cementu 52,5 R ve množství 40 g) a nakonec jsem mezi sebou porovnála i vzorky vyrobené ze směsi s kavitovanou demineralizovanou vodou, vzhledem ke třídě cementu.

### 3.3.5.1 Srovnání tlakových pevností vzorků s kavitovanou pitnou vodou; $w = 0,25$ (0,29)

Nejprve jsem mezi sebou tedy porovnávala tlakové pevnosti zkušebních vzorků vyrobených s kavitovanou pitnou vodou z vodovodního řadu ve směsi ve vodním součiniteli 0,25, v případě cementu 52,5 R ve vodním součiniteli 0,29 (v přepočtu ve množství 30 g, v případě cementu 52,5 R ve množství 35 g). U těchto tlakových pevností jsem očekávala, že cement 52,5 R projeví ty nejvyšší pevnosti v tlaku, cement třídy 42,5 R o něco málo menší a nakonec cement 32,5 R bude mít ty nejmenší pevnosti v porovnání s ostatními pevnostními třídami. Grafické vyhodnocení jsem uvedla níže v grafu č. 35.



Graf 35: Vyhodnocení nejučinnější třídy cementu s kavitovanou pitnou vodou;  $w = 0,25$  (0,29)

Zdroj: Vlastní šetření

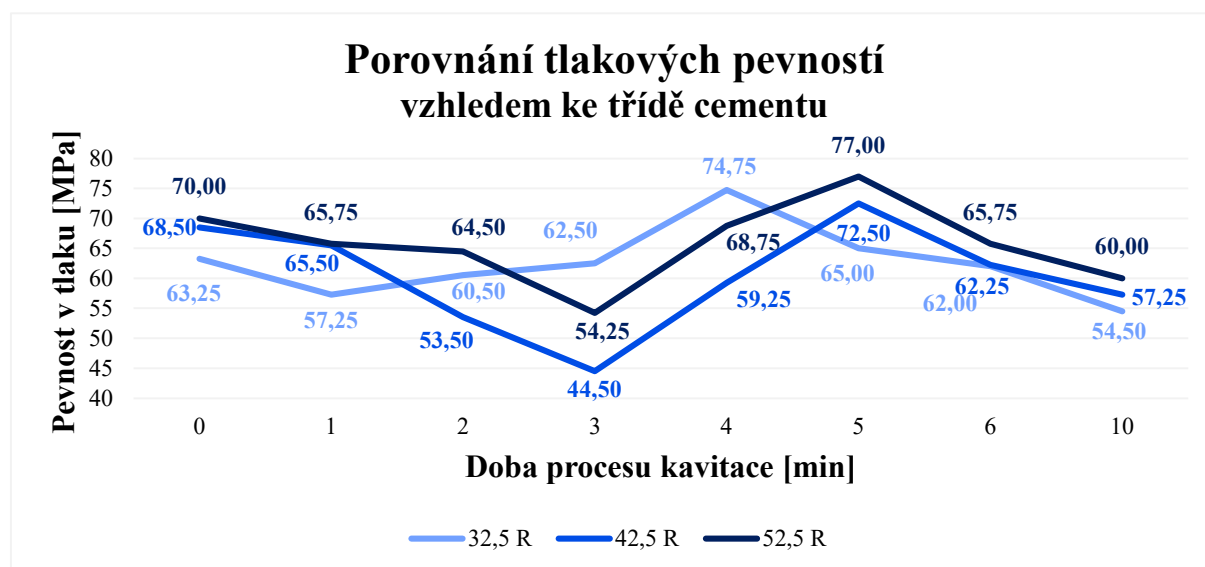
Z výše uvedeného grafu č. 35, kde se zabývám porovnáním jednotlivých křivek tlakových pevností zkušebních vzorků s kavitovanou vodou ve směsi ve vodním součiniteli 0,25, v případě jemně namleté pevnostní třídy cementu 52,5 R ve vodním součiniteli 0,29 (kde v přepočtu vodní součinitel 0,25 činí 30 g kavitované vody ve směsi a v případě cementu 52,5 R je to v přepočtu 35 g kavitované vody), je možné potvrzení počáteční teorie o kavitované vodě jako plastifikátoru (viz kapitola 4.1.1).

Všechny tlakové pevnosti v první minutě kavitacího procesu klesly na menší hodnotu, tento jev je odůvodněn nasycením kavitované vody rozpuštěným vzduchem, přesněji

atmosférickými plyny (především oxidem uhličitým), a neúplným rozbouráním shluků molekul vody za pomoci energie, kterou vyvolá kavitací přístroj MultiJet. Dále se však tlakové pevnosti zkušebních vzorků zvýší až do svého maxima (v případě cementu 32,5 R a 52,5 R tohoto maxima dosáhla voda při 4. minutě, kdežto v případě cementu 42,5 R už v minutě 3.). Tuto situaci jsem vyhodnotila především úplným rozbouráním právě již zmiňovaných shluků molekul vody a několika dalšími faktory, a to přesněji působením dipólů vody na rozpad shluků cementových zrn (větší reakční plocha zrn – náhrada za plastifikátor) a také rychlejším rozpuštěním CaO na Ca<sup>+</sup> a OH<sup>-</sup>, kdy OH<sup>-</sup> zapříčiní zvýšení pH vody a tím pádem i vyšší tlakové pevnosti. Jako poslední je vidět u všech křivek i následný spád tlakových pevností, kdy právě tato část průběhu křivky tlakových pevností je odůvodněna přílišným nasycením kavitované vody mikro bublinami vzduchu, čímž je zapříčiněna i následná pórovitost cementového tmelu, což naruší jednotnou strukturu zatvrdlých zkušebních vzorků a výsledkem toho procesu je i snížení tlakových pevností.

### 3.3.5.2 Srovnání tlakových pevností vzorků s kavitovanou pitnou vodou; w = 0,3 (0,33)

Další částí této kapitoly bylo i vyhodnocení tlakových pevností zkušebních vzorků pomocí grafu č. 36 zkušebních tělísek vyrobených ze směsí s kavitovanou pitnou vodou, která byla do zkušebních směsí přidána v množství vodního součinitele 0,3, v případě cementu 52,5 R v množství vodního součinitele 0,33 (v přepočtu přidána v množství 36 g, v případě cementu 52,5 R v množství 40 g), po určitých časových úsecích vzhledem k pevnostní třídě použitého cementu.



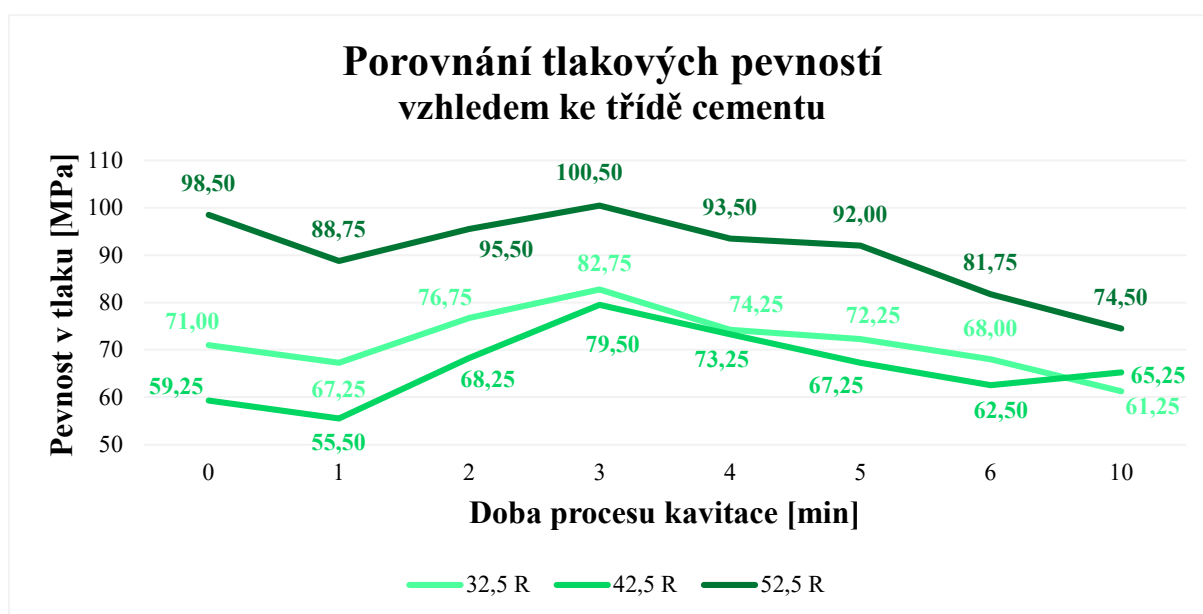
Graf 36: Vyhodnocení nejučinnější třídy cementu s kavitovanou pitnou vodou; w = 0,3 (0,33)

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 36 je vidět, že průběh tlakových pevností zkušebních vzorků funguje na stejném principu jako křivky tlakových pevností zkušebních vzorků vyrobených ze směsi s kavitovanou vodou ve vodním součiniteli 0,25, v případě cementu 52,5 R ve vodním součiniteli 0,29. Jediný rozdíl je ten, že pevnostní maximum se díky většímu množství vody ve směsi posunulo v případě cementu pevnostní třídy 52,5 R a 42,5 R na dobu 5 minut kavitačního procesu, v případě cementu 32,5 R se toto maximum tlakových pevností uskutečnilo již při 4 minutách kavitačního procesu.

### 3.3.5.3 Srovnání tlakových pevností s kavitovanou demineralizovanou vodou

Jako poslední podkapitolu této kapitoly jsem zvolila vzájemné srovnání tlakových pevností zkušebních vzorků vyrobených ze směsi s kavitovanou demineralizovanou vodou a různých pevnostních tříd cementů.



Graf 37: Vyhodnocení nejúčinnější třídy cementu s kavitovanou demineralizovanou vodou

Zdroj: Vlastní šetření

Z grafu č. 37, kde jsem mezi sebou porovnávala vzorky s kavitovanou demineralizovanou vodou jde i tady vidět, že průběh křivek tlakových pevností je stejný jako v kapitolách s kavitovanou pitnou vodou (odůvodnění v kapitole 4.1.1). Nejvyšší tlakové pevnosti dosáhly vzorky s cementem 52,5 R, kdy při 3. minutě kavitačního procesu dosáhly vzorky hodnoty 100,50 MPa. Vzorky s cementy 32,5 R a 42,5 R svého hodnotního maxima dosáhly také ve 3. minutě kavitačního procesu, a to přesně vzorky s cementem 32,5 R dosáhly hodnoty 82,75 MPa a vzorky s cementem 42,5 R dosáhly 79,50 MPa.



### 3.3.6 Výroba betonových vzorků s kavitovanou vodou

Jedním z největších přínosů kavitované vody je nahrazení plastifikačních přísad do betonových směsí za účelem vyšších pevností, a i pravděpodobně lepší zpracovatelnosti, proto jsem považovala za nutné vyzkoušet namíchání betonové směsí s kavitovanou pitnou vodou a tím si ověřit, že kavitovaná voda i v tomto případě bude fungovat stejně jako plastifikační přísada a získám díky ní vyšší tlakové pevnosti.

Jako zkoušku pro získání hodnot tlakových pevností jsem zvolila opět výrobu zkušebních tělísek 40 x 40 x 40 mm, kde jsem tedy místo klasické záměsové vody použila vodu, která prošla již zmiňovaným procesem kavitace (postupně zvyšovanou dobou kavitace)

Samotná zkouška tlakových pevností zkušebních tělísek celá započala tím, že jsem si pomocí digitální váhy odvážíla přesně 86 g cementu všech pevnostní tříd a 270 g písku do připravených plastových misek, kdy jsem poté všechny tyto sypké složky smíchala dohromady. Poté jsem si odměřila přesně 1 l pitné vody z vodovodního řádu, kterou jsem následně nalila do nádrže kavitačního přístroje, přístroj spustila a nechala vodu postupně kavitovat po dobu 3; 6 a 9 minut. Vždy po uplynutí každé z této doby kavitace jsem si za pomoci stříčky odměřila do další plastové misky přesně 45 g zkavitované pitné vody. Následně jsem již smíchané sypké složky nasypala do zkavitované vody. Tyto složky jsem poté pomocí špachtle promíchala. Pomocí vibračního stolku jsem docílila stavu, kdy bylo možno sjednotit všechny složky v jednotnou hmotu. Kovovou formu, kterou jsem předem vymazala olejem, jsem vyplnila namíchanou směsí z jedné poloviny a pomocí vibračního stolku nechala směs převést zpátky do tekutého stavu, aby se namíchaná směs rozprostřela po celém objemu formy. Poté jsem směsí vyplnila i druhou polovinu formy a znovu rozvibrovala, aby se směs rozprostřela i po zbytku formy. Následně jsem špachtlí zarovнала povrch tělísek do úplné roviny. Další den, kdy zkušební tělíska z části zatvrdla, jsem tělíska vyjmula z formy a uložila je do vlhkého prostředí a hydrotermálně upravila při 60 °C na dobu 16 hodin, díky čemuž dosáhly konečné fáze tuhnutí a tvrdnutí a také díky tomu dosáhly svých konečných tlakových pevností. Právě tuto zkoušku jsem provedla potom, co jsem nechala vzorky vysušit po dobu 4 hodin při 60 °C. Tlakové pevnosti jsem následně jsem následně zjistila na stejném principu jak v kapitole 3.2.21.

Konečné získané hodnoty tlakových pevností betonových vzorků jsem uvedla níže v tabulce č. 39, ze které následovně vychází i grafické vyobrazení v podobě grafu č. 38.

Tabulka 39: Pevnosti v tlaku betonových vzorků s kavitovanou vodou

Složky směsi [g]			Doba procesu kavitace	Pevnostní třída cementu	Zatěžující síla [kN]			Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]
Cement	Voda	Písek			1.	2.	Ø		
86	45	270	0	32,5 R	47,5	46,5	47,0	1600	29,38
				42,5 R	56,8	56,8	56,8		35,50
				52,5 R	83,5	81,5	82,5		51,56
			3	32,5 R	46,0	44,5	45,3		28,31
				42,5 R	48,0	50,0	49,0		30,63
				52,5 R	75,3	76,0	75,7		47,31
			6	32,5 R	47,5	45,5	46,5		29,06
				42,5 R	52,4	50,4	51,4		32,13
				52,5 R	77,0	78,2	77,6		48,50
			9	32,5 R	50,0	50,5	50,3		31,44
				42,5 R	59,2	58,5	58,9		36,81
				52,5 R	88,1	86,7	87,4		54,62
12	32,5 R	47,5	48,5	48,0	30,00				
	42,5 R	50,0	54,4	52,2	32,63				
	52,5 R	86,3	84,2	85,3	53,31				

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 38: Pevnost v tlaku betonových vzorků s kavitovanou vodou

Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafu č. 38 lze vidět, že průběh všech křivek je stejný. Z prvotních tlakových pevností klesne hodnota opět kvůli okysličení vody kavitací, následně tlakové pevnosti rostou díky rozbourání shluků molekul vody a působení dipólů jednotlivých molekul vody, dokud nedosáhnou svého hodnotního maxima a následně pevnosti zase klesnou kvůli

přesycení směsi mikro bublinami vzniklé ve zkavitované vodě. Zajímavým faktem této zkoušky byl fakt, že směsi s kavítovanou vodou byly více nadýchané díky mikro bublinám ve vodě. I v tomto případě se mi potvrdila teorie působení kavítované vody v cementovém tmelu, která je vysvětlena v kapitole 4.1.1.

### **3.3.7 Ztráta účinku kavítace v závislosti na čase**

Během míchání úplně prvních zkušebních směsí pro výrobu vzorků jsem si všimla faktu, že čím déle ponechám po procesu kavítace vodu tzv. odstát, tím se mění tlakové pevnosti vyrobených zkušebních tělísek. Proto jsem se rozhodla tento fakt ověřit samostatnými zkouškami tomu určenými.

Celou zkoušku jsem započala tím, že jsem nechala vodu pitnou z vodovodního řadu kavítovat po dobu 3 min (tato doba kavítace se kladně projevila v předchozích tlakových zkouškách) a následně ji odebírala po časových úsecích, a to po 0; 10; 20 a 30 minutách, a použila ji jako vodu záměsovou pro výrobu zkušebních tělísek. Tuto vodu v množství 30 g jsem následně tedy smíchala pomocí špachtle s předem odváženým cementem 120 g a postupně všech zkoušených tříd 32,5 R, 42,5 R a 52,5 R. Navážené suroviny jsem promíchala a pomocí vibračního stolku. Po spojení všech složek jsem přešla k fázi, kdy jsem touto směsí naplnila předem olejem vymazané kovové formy a připravenou směs ztuhlila. Pomocí špachtle jsem následně zarovnávala povrch formy a nechala zkušební tělíška dostatečně ztuhnout ve formě. Celou tuto část jsem zopakovala vždy po 10 minutách odstátí zkavitované vody. Zjevný byl fakt, že čím déle byla voda po kavitačním procesu, tím hůře se směs pracovalo, tudíž nejhůře se pracovalo se směsí s kavítovanou vodou po 30 minutách od procesu kavítace. Po fázi ztuhnutí jsem zkušební tělíška vyjmula z formy a nechala dozrát v 100 % vlhkém prostředí. Po tomto zatvrdnutí jsem zkušební vzorky uložila vysušit na 16 h do sušárny při teplotě 60 °C, kdy poté vzorky dosáhly konečných tlakových pevností. Následně jsem pomocí hydraulického lisu zjišťovala tlakové pevnosti.

Výslednými zkouškami získané tlakové pevnosti vykazovali nesystematické výsledky bez jakýchkoliv návazností a nebylo možné zjistit nějakou zákonitost, která by v tomto průběhu stání kavítované vody (která se nemíchá) ovlivňovala její vlastnosti.

Usoudila jsem, že pokud je voda v klidu postupně se z ní vytrácí rozptýlené vzduchové bublinky, kde rychlost jejich ztráty je dána jejich velikostí, a protože voda není zamíchána, nemá konkrétní složení po celém objemu, její odběr byl z náhodného místa, tudíž vzhledem k jejímu stavu nemůžeme očekávat nějaké zákonitosti. Z uvedeného vyplývá, že použitá voda

musí být vždy řádně promíchána a její použití není možné provádět po delší době od její kavitace.

## 4 Vyhodnocení a návrhy využití kavitované vody

Zkoušenou upravenou (modifikovanou) vodu je možno využít hned několika způsoby, a to nejen ve stavebnictví, což je hlavním cílem této práce, ale také v jiných oborech. Kavitovanou vodu při splnění určitých podmínek, které se musí zajistit a zjistit během použití v praxi, lze využít ve stavebnictví především při přípravě kompozitů jako vodu záměsovou a zároveň jako přísadu pro získání vyšších tlakových pevností.

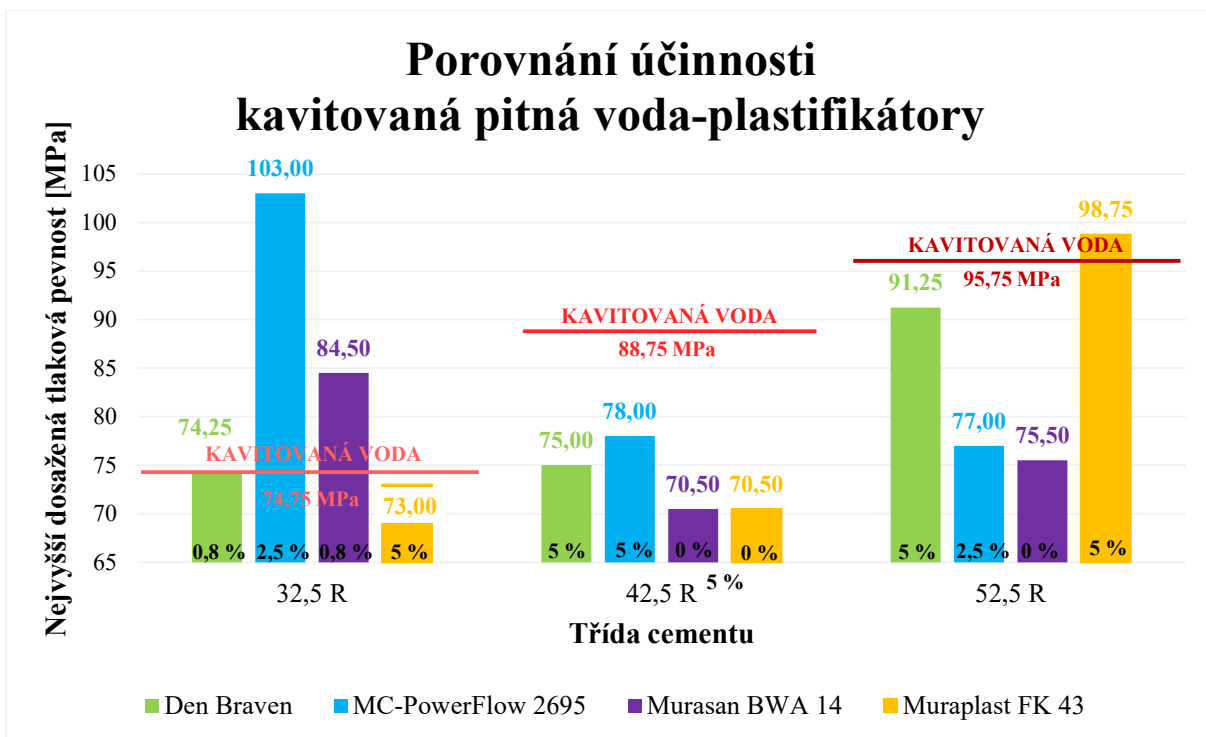
### 4.1 Návrhy a možnosti využití kavitované vody ve stavebnictví

Využití kavitované vody je nejenom velice široké, ale i zajímavé. Ráda bych v této kapitole uvedla některé z případů jejího využití, a to zejména ve stavebních procesech a dále pak i v jiných oborech.

#### 4.1.1 Náhrada plastifikátorů

Vzhledem k tomu, že celá řada stavebních procesů probíhá na bázi vody, je možné tuto vodu využít, jak je pojednáno v této práci na přípravu betonů, jako částečnou nebo úplnou náhradu plastifikátorů. Jak bylo zjištěno a ověřeno zkouškami na připravených zkušebních vzorcích je nutné posouzení provádět konkrétně k daným surovinám, aby byl výsledek co možná s nejvyšším účinkem ve směsi. Zjištěné výsledky fungují jako ukazatel naznačující správný směr výzkumu.

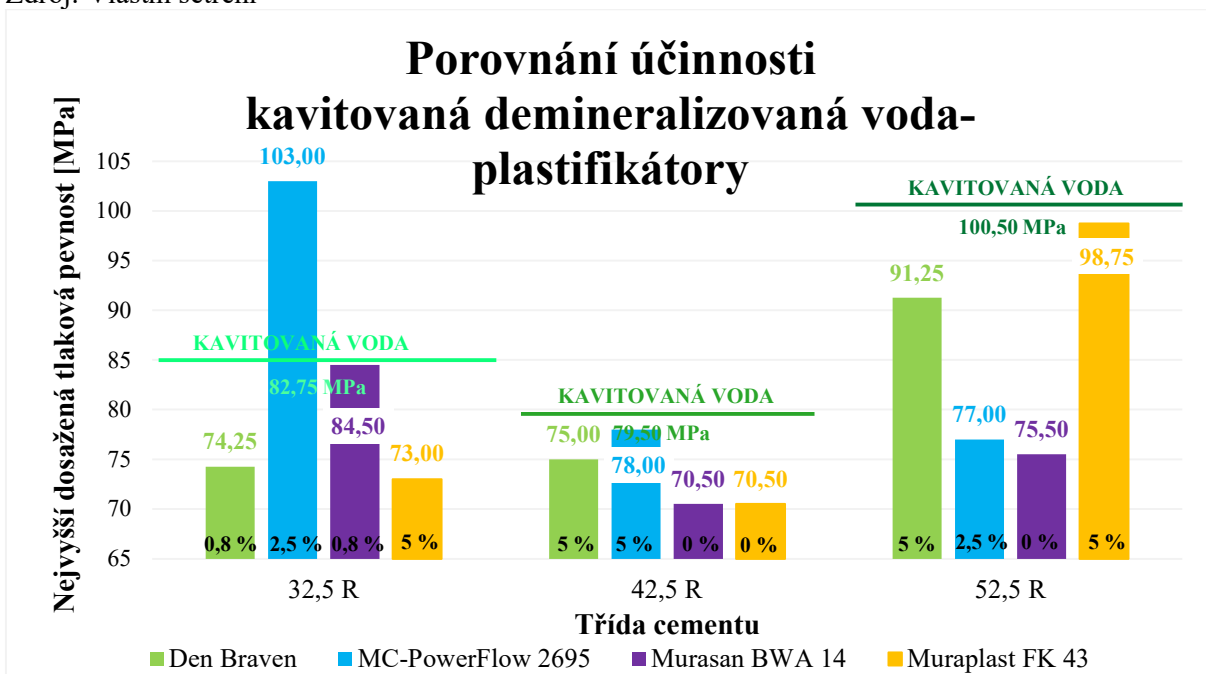
V následujících grafech č. 39 a 40 je vyobrazeno srovnání nejvyšších tlakových pevností zkušebních tělísek vyrobených ze směsi s přídavkem jednotlivého plastifikátoru vzhledem k pevnostní třídě použitého cementu a tlakových pevností zkušebních vzorků s kavitovanou pitnou a demineralizovanou vodou. S cementem 32,5 R dosáhla voda kavitovaná pitná pevnosti 74,75 MPa, což překonalo jeden použitý plastifikátor a jednomu se rovnala, a s vodou demineralizovanou 82,75 MPa, kdy překonala dvě tlakové pevnosti s použitím plastifikátoru. Kavitovaná pitná voda společně s cementem 42,5 R svou tlakovou pevností 88,75 MPa překonala všechny tlakové pevnosti vzorků ze směsi s plastifikátory a voda demineralizovaná také překonala všechny plastifikátory (79,50 MPa). Nakonec s cementem 52,5 R reagovala kavitovaná pitná voda tak, že tlaková pevnost vzorků s kavitovanou pitnou vodou (95,75 MPa) překonala tlakové pevnosti tří použitých plastifikátorů a kavitovaná demineralizovaná voda pomohla k tlakové pevnosti vzorků 100,50 MPa, což je pevnost, která překonala všechny pevnosti vzorků získané za pomoci plastifikátorů. Na následném obrázku č. 7 je popsáno, jak a proč kavitovaná voda funguje v cementovém tmelu (viz kapitola 3.3).



Graf 39: Porovnání tlakových pevností vzorků s plastifikátory s kavitovanou pitnou vodou

Poznámka: V uvedeném grafu je podíl použitých plastifikátorů ve směsi u nejvyšších hodnot dosažených tlakových pevností uveden ve spodní části jednotlivých sloupcových grafů.

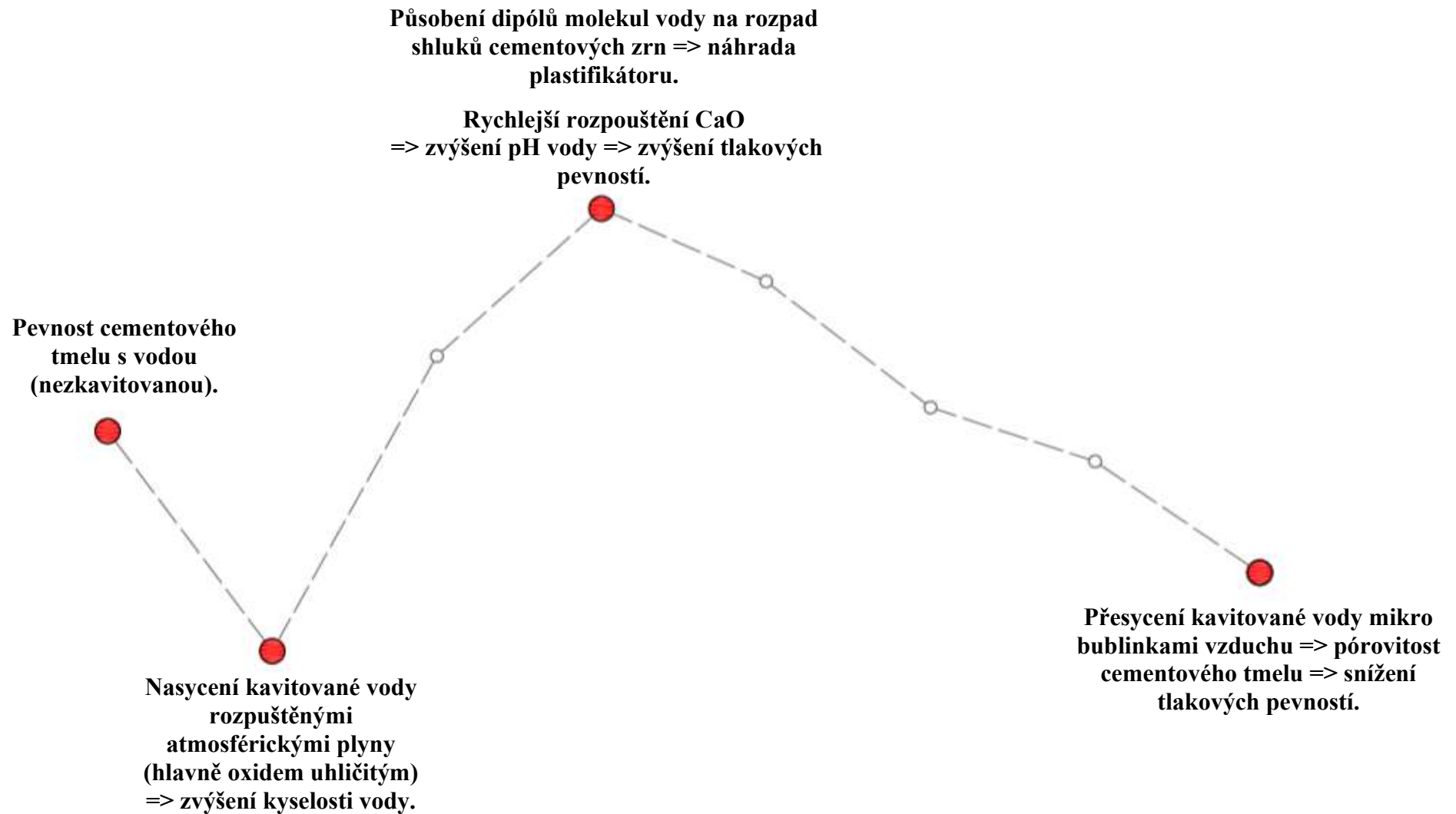
Zdroj: Vlastní šetření



Graf 40: Porovnání tlakových pevností vzorků s plastifikátory s kavitovanou demi vodou

Poznámka: V uvedeném grafu je podíl použitých plastifikátorů ve směsi u nejvyšších hodnot dosažených tlakových pevností uveden ve spodní části jednotlivých sloupcových grafů.

Zdroj: Vlastní šetření



Obr. 7: Schématický průběh vzniku a působení kavitované vody v cementovém tmelu

### **4.1.2 Zlepšení mrazuvzdornosti**

Vlivem kavitované vody se voda obohatí o mikrobublínky a tím dochází k provzdušnění betonové směsi, což má následně velmi pozitivní vliv na mrazuvzdornost.

### **4.1.3 Zlepšení zpracovatelnosti**

Dá se předpokládat toto využití i při přípravě malt různého druhu, potěrů, samonivelačních podlah apod., kdy tato technologie zajistí lepší zpracování hmot při ukládání a tím sníží náročnost těchto prací.

### **4.1.4 Výroba keramických výrobků**

Jak již bylo uvedeno, přípravou kavitované vody dochází k rozbourání shluků molekul vody a ty samostatně působí jako tenzidy s dipólem a tímto působením mohou zajistit zlepšení plasticity cihlářského těsta při výrobě cihlářských výrobků. Dochází totiž k snížení napětí elektrického potenciálu v mezivrstvách jílových materiálů a tím je možné snížit množství vody používané pro zvýšení plasticity jílu při výrobě keramiky obecně, ale nejdůležitější je to, že dojde k úspoře energie při sušení výrobků před výpalem, a hlavně se tím sníží i smrštění hmoty což bude mít velký vliv zejména na praskání při sušení a rozměrovou přesnost výrobků.

## **4.2 Návrhy a možnosti využití kavitované vody v jiných oborech**

Po zamyšlení nad využitím kavitované vody i jinde než ve stavebnictví víme, že při kavitaci nedochází jen k rozštěpení shluků molekul vody, ale i k rozpouštění atmosférických plynů, kde se zejména nejlépe rozpouští kyslík, a to ve formě vzduchových mikro bublin.

### **4.2.1 Odstranění nečistot**

Jednotlivé molekuly vody fungují jako tenzidy, které lépe odstraňují špínu z látek a usnadňují čištění od špíny s tím, že i následně zamezí vzniku elektrostatických nábojů na povrchu vyčištěného prádla.

### **4.2.2 Urychlení sedimentace**

Využití popisované technologie v této práci a její aplikací je také možné využít k urychlení sedimentace mikročástic ve vodných suspenzích vznikem shluků (vloček), které pak rychleji sedimentují než jednotlivé částice a tím se tento proces urychlí.





Obr. 8: Sedimentace rozptýlených částic v nezkavitované a zkavitované suspenzi

#### 4.2.3 Využití k záливce rostlin

Jak bylo v úvodu napsáno, kyslík se ve vodě rozpouští při 20 °C v množství 0,0310 a to i přesto, že jeho obsah v atmosféře podstatně menší než dusíku (0,0152). Tímto způsobem se ke kořenům dostává kyslík a oxidy dusíku, čímž se zlepšuje výživa rostlin, což je vidět na kořenech a olistění.

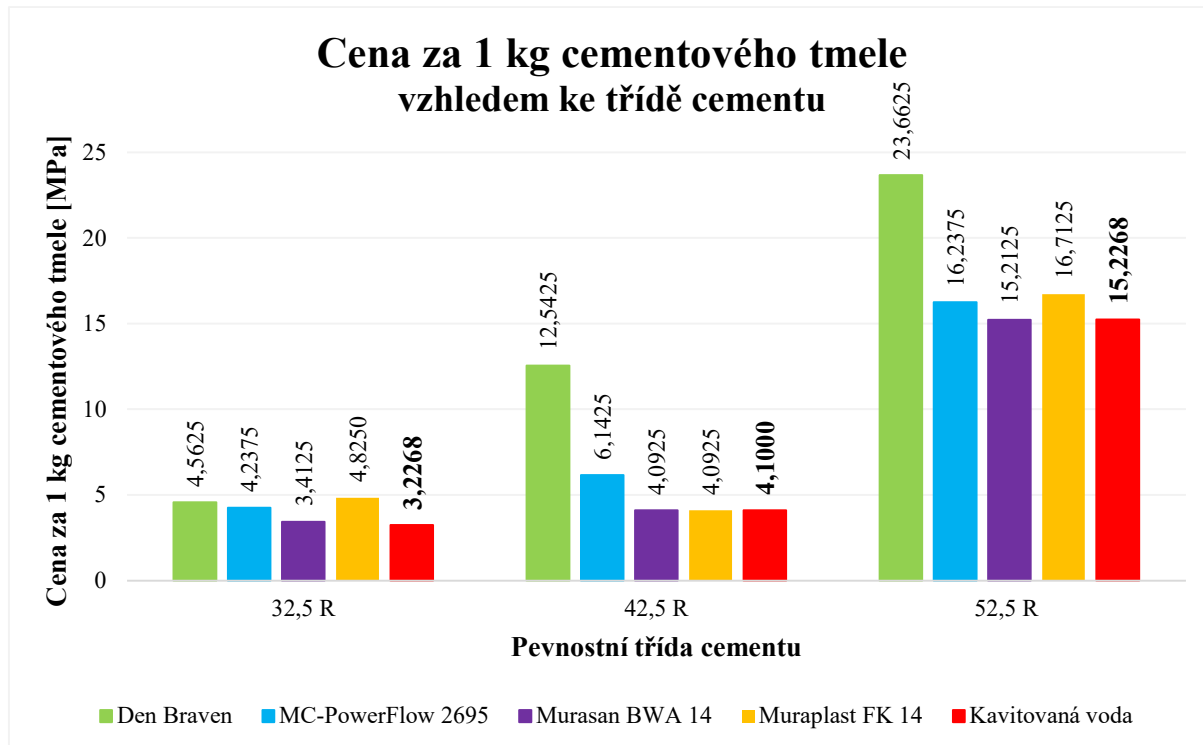


Obr. 9: Rostliny zalévané obyčejnou vodou a kavítovanou vodou v praxi

### 4.3 Ekonomické vyhodnocení

Ekonomické vyhodnocení a přínosy práce spočívají především v posouzení ceny použitých plastifikátorů k použitému množství ve směsi k dosažení nejvyšší tlakové pevnosti cementového tmelu na vyrobených zkušebních vzorcích. Dále zde byly posuzovány i náklady na výrobu kavitované vody, které spočívaly v množství spotřebovaného elektrického proudu na pohon čerpadla kavitačního přístroje MultiJetu.

Ekonomická výhodnost použití kavitované vody do cementového tmelu je graficky zobrazena v grafu č. 41, který vychází z níže uvedené tabulky č. 42. Z tohoto grafu je zřejmé, že použití kavitované vody do směsi za účelem nejvyšších možností tlakových pevností je vzhledem k ekonomické stránce výhodnější než použití plastifikačních přísad. Jedním z největších přínosů této práce je ten fakt, že pro dosažení vyšších nebo alespoň stejných tlakových pevností (viz tabulka č. 42) je úplná možnost vynechání plastifikačních přísad při míchání v mém případě cementového tmele (funkčnost kavitované vody v betonových směsích je uvedena a zobrazena v kapitole 3.3.6). V grafu č. 42 a tabulce č. 41 je zobrazeno zdražení (případně úspora) ceny cementového tmelu s plastifikátory oproti ceně cementového tmelu s kavitovanou vodou.



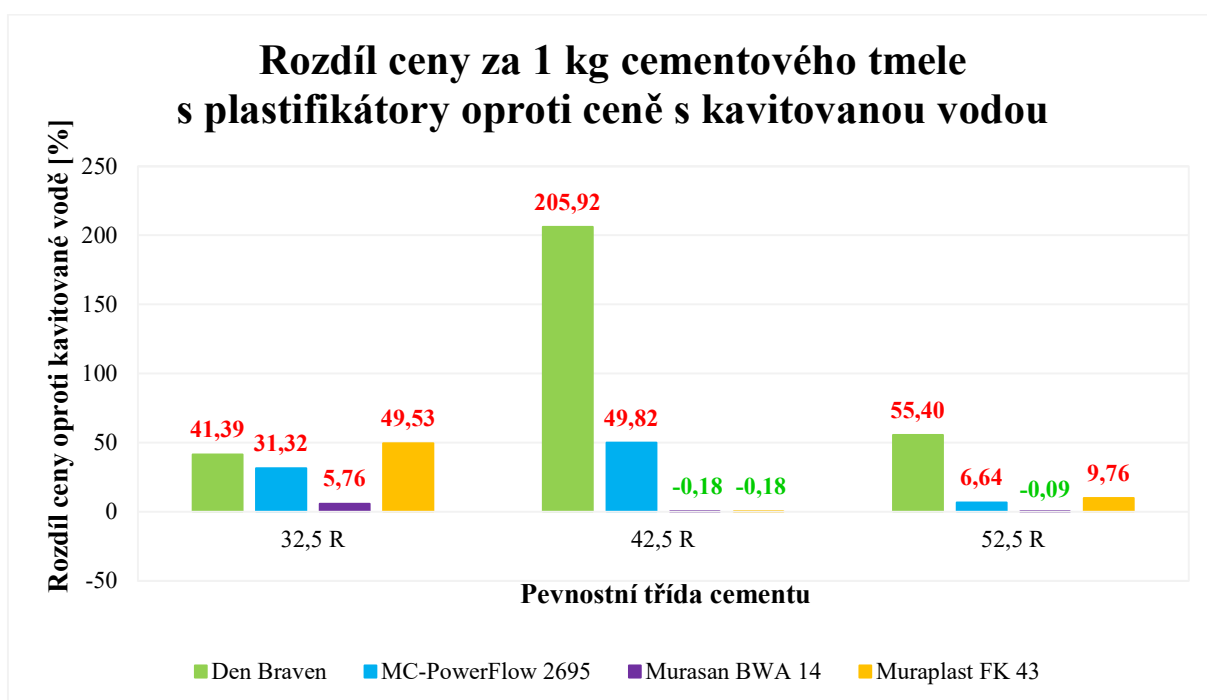
Graf 41: Ekonomické vyhodnocení vzorků s plastifikátory a kavitovanou vodou

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 40: Úspora/zdražení cementového tmelu s plastifikátory

Druh plastifikátoru		Den Braven	MC-PowerFlow	Murasan BWA 14	Muraplast FK 43	Kavitovaná voda
Nejvyšší pevnost v tlaku [MPa]	32,5 R	74,25	103,00	84,50	73,00	74,75
	42,5 R	75,00	78,00	70,50	70,50	88,75
	52,5 R	91,25	77,00	75,50	98,75	95,75
Úspora/zdražení ceny [%]	32,5 R	+41,39	+31,32	+5,76	+49,53	-
	42,5 R	+205,92	+49,82	-0,18	-0,18	-
	52,5 R	+55,40	+6,64	-0,09	+9,76	-

Zdroj: Vlastní šetření



Graf 42: Rozdíl cen vzorků s plastifikátory a kavitovanou vodou

Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 41: Ekonomické vyhodnocení vzorků s plastifikátory nebo kavitovanou vodou

Druh plastifikátoru		Den Braven	MC-PowerFlow 2695	Murasan BWA 14	Muraplast FK 43	Kavitovaná voda
<b>CEM 32,5 R</b>	Cena [Kč/kg]	169,0000	41,0000	25,0000	30,0000	0,0200
	Množství použité pro nejvyšší pevnost [%]	0,8	2,5	0,8	5,0	25,0
	Dosažená tlaková pevnost [MPa]	<b>74,25</b>	<b>103,00</b>	<b>84,50</b>	<b>73,00</b>	<b>74,75</b>
	Doba procesu kavitace [min]	-	-	-	-	4
3,20 Kč/kg	Výkon motoru čerpadla [W]	-	-	-	-	80
	Cena za Wh energie [Kč]	-	-	-	-	0,0050
	Cena za 1 kg cementového tmelu [Kč]	<b>4,5625</b>	<b>4,2375</b>	<b>3,4125</b>	<b>4,8225</b>	<b>3,2268</b>
	Rozdíl ceny oproti kavitované vodě [%]	<b>+41,69</b>	<b>+31,60</b>	<b>+5,98</b>	<b>+49,77</b>	-
<b>CEM 42,5 R</b>	Cena [Kč/kg]	169,0000	41,0000	25,0000	30,0000	0,0200
	Množství použité pro nejvyšší pevnost [%]	5,0	5,0	0,0	0,0	25,0
	Dosažená tlaková pevnost [MPa]	<b>75,00</b>	<b>78,00</b>	<b>70,50</b>	<b>70,50</b>	<b>88,75</b>
	Doba procesu kavitace [min]	-	-	-	-	3
4,08 Kč/kg	Výkon motoru čerpadla [W]	-	-	-	-	80
	Cena za Wh energie [Kč]	-	-	-	-	0,0050
	Cena za 1 kg cementového tmelu [Kč]	<b>12,5425</b>	<b>6,1425</b>	<b>4,0925</b>	<b>4,0925</b>	<b>4,1000</b>
	Rozdíl ceny oproti kavitované vodě [%]	<b>+205,92</b>	<b>+49,82</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,18</b>	-
<b>CEM 52,5 R</b>	Cena [Kč/kg]	169,0000	41,0000	25,0000	30,0000	0,0200
	Množství použité pro nejvyšší pevnost [%]	5,0	2,5	0,0	5,0	29,2
	Dosažená tlaková pevnost [MPa]	<b>91,25</b>	<b>77,00</b>	<b>75,50</b>	<b>98,75</b>	<b>95,75</b>
	Doba procesu kavitace [min]	-	-	-	-	4
15,20 Kč/kg	Výkon motoru čerpadla [W]	-	-	-	-	80
	Cena za Wh energie [Kč]	-	-	-	-	0,0050
	Cena za 1 kg cementového tmelu [Kč]	<b>23,6625</b>	<b>16,2375</b>	<b>15,2125</b>	<b>16,7125</b>	<b>15,2268</b>
	Rozdíl ceny oproti kavitované vodě [%]	<b>+55,47</b>	<b>+6,69</b>	<b>-0,05</b>	<b>+9,81</b>	-

Zdroj: Vlastní šetření

## Závěr

Předložená práce se zabývá charakteristikami vody používané na výrobu betonových výrobků nebo konstrukcí a možnostmi její úpravy vhodnými mechanicko-fyzikálními procesy se zaměřením na změnu jejího stavu tak, aby působením v cementovém tmelu zlepšovala jeho vlastnosti za poskytnutí vyšších pevností vyrobených betonů s možností jejich plastifikace polární charakterizace jednotlivých molekul.

Budoucnost vývoje této metody je hlavně ve spojení s různými druhy cementů pro výrobu betonu a betonových kompozitů, kdy má takto modifikovaná voda lepší vlastnosti. Cílem není její příprava málo nákladným způsobem, ale také úspora nebo odstranění používání plastifikátorů, jež ve většině případů plně nahradí, ne-li předčí zejména v tlakových pevnostech výrobků a pomůže také zlepšit enviromentální působení a snížit chemické zatížení vyráběných směsí, což je nosným požadavkem této metody. Jedním z předních přínosů, jak již bylo citováno, je také snížení ekonomických nároků na vlastní výrobu stavebních prvků. Abychom mohli správně určit stav (aktivaci) vody při její přípravě je nutné řádně pozorovat měnící se její charakteristiky, které musí být zjištěny a zajištěny během použití v praxi, protože kvalita kavitované vody je určena použitím a použitým množstvím. Proto hlavním požadavkem pro aplikaci v praxi je důležité řádné rozfázování jednotlivých činností, jejich kontrola a návaznosti při změně surovin pro výrobu.

Ze zjištěných poznatků z této práce bude v budoucnu vycházet celá řada výrobních podniků v návaznosti na zdrojích surovin. Bude možné této metody využít u jiných druhů stavebních pojiv a získat tak jejich specifické vlastnosti při použití ve výrobě, lepší znalosti vlastností materiálů z výrobních procesů a jejich přípravy spojené zejména s jejich hydratačními reakcemi, což vede k úspěšnému zapojení nových metod při přípravě stavebních kompozitů.

V této práci byl nastíněn jeden z mnoha směrů možnosti využití upravené záměsové vody i v kombinaci s vodou demineralizovanou. Řeší tedy ekologické i ekonomické problémy současně a přispívá výrobně k snížení používání chemických přípravků při výrobě betonových směsí. Je možné říct, že upravená voda na bázi její kavitace dosahuje velmi dobrých užitných vlastností a bude se velmi výrazně postupně prosazovat a podílet jako hlavní materiál při výrobě tradičních PC betonů, které lze označit za materiály 21. století.

## Seznam literatury

- [1] Ing. VOREL Jindřich, Disertační práce – Kompozity na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátů; Chemická fakulta – ústav chemie materiálů.
- [2] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
- [3] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [4] MALÝ, Josef a Pavla ROVNANÍKOVÁ. *Základy chemie: učební text pro studenty distančního a denního studia*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1995. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0611-9.
- [5] TEYSSLER, Petr a Václav KOTYŠKA. *Technický slovník naučný: ilustrovaná encyklopedie věd technických, díl I*. Praha: Nakladatelé Borský a Šulc, 1927.
- [6] Henning, Otto; Lach, Vladimír chemie ve stavebnictví 1983, 1. vydání, Vydavatel: SNTL, Místo vydání: Praha.
- [7] BLAŽEK, Jaroslav a Ján FABINI. *Chemie pro studijní obory SOŠ a SOU nechemického zaměření*. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 8072351044.
- [8] DAVÍDEK Tomáš, Středoškolská odborná činnost – Využití betonového kalu; Střední průmyslová škola stavební Josefa Gočára.
- [9] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADkov%C3%A1\\_vazba](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADkov%C3%A1_vazba).
- [10] Technické listy výrobce cementu.
- [11] Technické listy výrobce plastifikátoru.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Závislost absorpčního koeficientu vody na teplotě.....	16
Tabulka 2: Technické údaje pro plastifikátor Den Braven.....	21
Tabulka 3: Technické údaje pro plastifikátor MC-PowerFlow 2695.....	21
Tabulka 4: Technické údaje pro plastifikátor Murasan BWA 14.....	22
Tabulka 5: Technické údaje pro plastifikátor Muraplast FK 43.....	22
Tabulka 6: Složení cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.....	23
Tabulka 7: Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.....	23
Tabulka 8: Složení cementu CEM I 42,5 R.....	23
Tabulka 9: Mechanické vlastnosti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R.....	24
Tabulka 10: Složení cementu CEM I 52,5 R.....	24
Tabulka 11: Mechanické vlastnosti CEM I 52,5 R.....	24
Tabulka 12: Určení pevností v tlaku tělísek bez plastifikátorů.....	26
Tabulka 13: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Den Braven a CEM 32,5 R.....	27
Tabulka 14: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a CEM 32,5 R.....	28
Tabulka 15: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a CEM 32,5 R.....	30
Tabulka 16: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a CEM 32,5 R.....	32
Tabulka 17: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Den Braven a CEM 42,5 R.....	35
Tabulka 18: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a CEM 42,5 R.....	36
Tabulka 19: Pevností v tlaku tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a CEM 42,5 R.....	37
Tabulka 20: Pevností v tlaku tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a CEM 42,5 R.....	38
Tabulka 21: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Den Braven a CEM 52,5 R.....	40
Tabulka 22: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a CEM 52,5 R.....	41
Tabulka 23: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a CEM 52,5 R.....	42
Tabulka 24: Pevnosti v tlaku tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a CEM 52,5 R.....	43
Tabulka 25: Tlaková pevnosti tělísek s plastifikátorem Den Braven a třídami cementů.....	45
Tabulka 26: Tlakové pevnosti tělísek s plastifikátorem MC-PowerFlow 2695 a třídami cementů.....	47
Tabulka 27: Tlakové pevnosti tělísek s plastifikátorem Murasan BWA 14 a třídami cementů.....	48
Tabulka 28: Tlaková pevnost tělísek s plastifikátorem Muraplast FK 43 a třídami cementů.....	50
Tabulka 29: Tlakové pevnosti vzhledem k výkonosti stroje.....	54
Tabulka 30: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R, $w = 0,25$ .....	57
Tabulka 31: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R, $w = 0,3$ .....	58
Tabulka 32: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 32,5 R.....	59
Tabulka 33: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R; $w = 0,25$ .....	61
Tabulka 34: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R; $w = 0,3$ .....	62
Tabulka 35: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 42,5 R.....	63
Tabulka 36: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R; $w = 0,29$ .....	66
Tabulka 37: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R; $w = 0,33$ .....	67
Tabulka 38: Pevnosti v tlaku tělísek s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 52,5 R.....	68
Tabulka 39: Pevnosti v tlaku betonových vzorků s kavitovanou vodou.....	74
Tabulka 41: Úspora/zdražení cementového tmelu s plastifikátory.....	83
Tabulka 42: Ekonomické vyhodnocení vzorků s plastifikátory nebo kavitovanou vodou.....	84

## Seznam grafů

Graf 1: Nárůst pevností v tlaku tělísek v závislosti na třídě cementu.....	26
Graf 2: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Den Braven s CEM 32,5 R.....	28
Graf 3: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor MC-PowerFlow 2695 s CEM 32,5 R.....	29
Graf 4: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Murasan BWA 14 s CEM 32,5 R.....	30

Graf 5: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Muraplast FK 43 s CEM 32,5 R .....	33
Graf 6: Vyhodnocení nejúčinnějšího plastifikátoru s CEM 32,5 R .....	33
Graf 7: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Den Braven s CEM 42,5 R .....	35
Graf 8: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor MC-PowerFlow 2695 s CEM 42,5 R .	36
Graf 9: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Murasan BWA 14 s CEM 42,5 R .....	37
Graf 10: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Muraplast FK 43 s CEM 42,5 R .....	38
Graf 11: Vyhodnocení nejúčinnějšího plastifikátoru s CEM 42,5 R .....	39
Graf 12: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Den Braven s CEM 52,5 R.....	40
Graf 13: Tlaková pevnost vzorků v závislosti voda – plastifikátor MC-PowerFlow 2695 s CEM 52,5 R	41
Graf 14: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Murasan BWA 14 s CEM 52,5 R ....	42
Graf 15: Pevnost v tlaku vzorků v závislosti voda – plastifikátor Muraplast FK 43 s CEM 52,5 R .....	43
Graf 16: Vyhodnocení nejúčinnějšího plastifikátoru s CEM 52,5 R .....	44
Graf 17: Porovnání účinků plastifikátoru Den Braven ve směsi vzhledem ke třídě cementu.....	46
Graf 18: Porovnání účinků plastifikátoru MC-PowerFlow 2695 ve směsi vzhledem ke třídě cementu .	47
Graf 19: Porovnání účinků plastifikátoru Murasan BWA 14 ve směsi vzhledem ke třídě cementu.....	49
Graf 20: Porovnání účinků plastifikátoru Muraplast FK 43 ve směsi vzhledem ke třídě cementu.....	50
Graf 21: Porovnání nejvýše dosažených tlakových pevností vzhledem ke třídě cementu.....	51
Graf 22: Tlakové pevnosti v závislosti na výkonu stroje .....	54
Graf 23: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R, w = 0,25 .....	57
Graf 24: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 32,5 R, w = 0,3 .....	58
Graf 25: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 32,5 R.....	59
Graf 26: Porovnání pevností v tlaku s kavitovanou vodou a CEM 32,5 R .....	60
Graf 27: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R, w = 0,25 .....	62
Graf 28: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 42,5 R, w = 0,3 .....	63
Graf 29: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 42,5 R.....	64
Graf 30: Porovnání pevností v tlaku s kavitovanou vodou a CEM 42,5 R.....	64
Graf 31: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R, w = 0,29 .....	66
Graf 32: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou pitnou vodou a CEM 52,5 R, w = 0,33 .....	67
Graf 33: Pevnost v tlaku vzorků s kavitovanou demineralizovanou vodou a CEM 52,5 R.....	68
Graf 34: Porovnání pevností v tlaku s kavitovanou vodou a CEM 52,5 R .....	69
Graf 35: Vyhodnocení nejúčinnější třídy cementu s kavitovanou pitnou vodou; w = 0,25 (0,29).....	70
Graf 36: Vyhodnocení nejúčinnější třídy cementu s kavitovanou pitnou vodou; w = 0,3 (0,33) .....	71
Graf 37: Vyhodnocení nejúčinnější třídy cementu s kavitovanou demineralizovanou vodou.....	72
Graf 38: Pevnost v tlaku betonových vzorků s kavitovanou vodou.....	74
Graf 39: Porovnání tlakových pevností vzorků s plastifikátory s kavitovanou pitnou vodou .....	78
Graf 40: Porovnání tlakových pevností vzorků s plastifikátory s kavitovanou demi vodou.....	78
Graf 41: Ekonomické vyhodnocení vzorků s plastifikátory a kavitovanou vodou .....	82
Graf 42: Rozdíl cen vzorků s plastifikátory a kavitovanou vodou.....	83

## Seznam obrázků

Obr. 1: Vodíkové můstky .....	13
Obr. 2: Model jednotlivých a asociovaných molekul vody.....	14
Obr. 3: Destrukce vzorků ze směsi CEM 32,5 R, voda a plastifikátor Murasan BWA 14 (6 g).....	29
Obr. 4: Určení pH vzorku s a bez plastifikátoru Murasan BWA 14 v množství 6 g (5 %).....	30
Obr. 5: RTG tělísek s vodou bez použití plastifikátoru.....	31
Obr. 6: RTG vzorku voda – plastifikátor Murasan BWA 14 v množství 6 g (5 %) z hm. c. ....	31
Obr. 7: Schématický průběh vzniku a působení kavitované vody v cementovém tmelu.....	79
Obr. 8: Sedimentace rozptýlených částic v nezkavitované a zkavitované suspenzi .....	81



Obr. 9: Rostliny zalévané obyčejnou vodou a kavitovanou vodou v praxi..... 81

## Seznam příloh

Příloha 1: Grafické vyobrazení pracovních pomůcek ..... 89

Příloha 1: Grafické vyobrazení pracovních pomůcek



Formy na výrobu zkušebních 6ti zkušebních vzorků o rozměru  $a = 20 \times 20 \times 20$  mm.



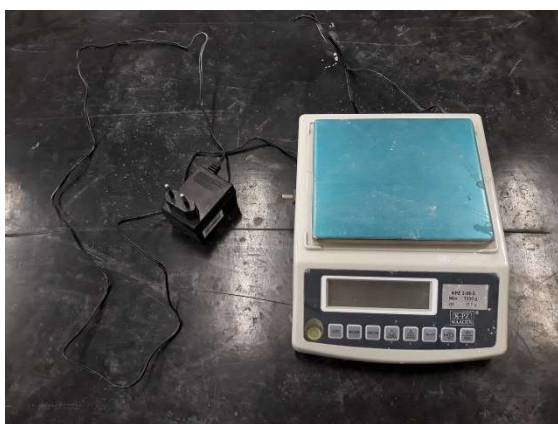
Zkušební lis na stanovení pevnosti vzorků v tlaku.



Horkovzdušná sušárna na sušení i pro hydrotermální zpracování vzorků.



Exikátor s vodní náplní pro normální zrání při laboratorní teplotě.



Digitální váha na přípravu navážek surovin do surovinových směsí.



Vibrolis na pomoc při míchání vzorků a zhuťování směsí.



Elektrická pec pro tepelné úpravy surovin i vzorků.



Přístroj na výrobu kavitované vody MultiJet.