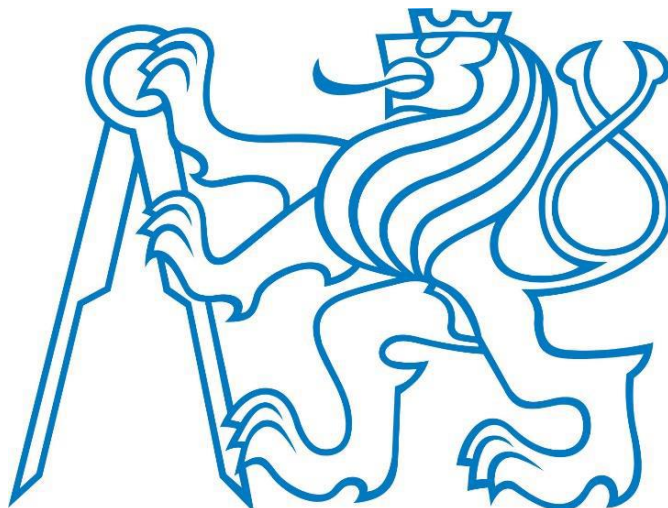


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**TECHNOLOGICKÉ, REOLOGICKÉ A
MECHANICKÉ VLASTNOSTI CEMENTOVÝCH
KOMPOZITŮ URČENÝCH PRO SOLIDIFIKACI
KAPALNÉHO RADIOAKTIVNÍHO ODPADU**

TECHNOLOGICAL, RHEOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT
COMPOSITES FOR LIQUID RADIOACTIVE WASTE SOLIDIFICATION

2018/2019

Rostislav Kokeš
Vedoucí práce: Ing. Jan Zatloukal, Ph.D.

Zadání BP

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího bakalářské práce, a veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 26. 5. 2019

.....

Rostislav Kokeš

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janovi Zatloukalovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a hodnotné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavě Kořátkové za spolupráci, výpomoc při laboratorních zkouškách a poskytnutí cenných podkladů.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou zpracování a ukládání tekutého radioaktivního odpadu. Konkrétně jde o koncentrát několika chemických sloučenin, který je používán v primárním okruhu tlakovodního reaktoru jaderných elektráren jako moderátor. Jeho významnou složkou je kyselina boritá, která výrazně ovlivňuje vlastnosti cementových materiálů. Uvádím zde možnosti, kterými se tato kapalina zpracovává dnes, jejich výhody a nevýhody. Hlavní náplní je však zkoumání chování různých cementových kompozitů, pro solidifikaci tohoto koncentráту.

V rámci experimentu jsem vytvářel vzorky osmi různých směsí pojiv, vždy s dvěma vodními součiniteli. Na nich jsem zjišťoval technologické, reologické a mechanické vlastnosti. Tyto vzorky jsem pak mezi sebou porovnával.

Klíčová slova: *radioaktivní odpad, cementový kompozit, technologické vlastnosti, reologické vlastnosti, mechanické vlastnosti*

Abstract

This work deals with processing and storage of liquid radioactive waste. Specifically, it is a concentrate of several chemical compounds that is used as a moderator in the primary circuit of the pressurized water reactor of nuclear power plants. Its important component is boric acid, which significantly affects the properties of cement materials. I present here the possibilities that this liquid is processed today, its advantages and disadvantages. However, the main focus is on the behavior of various cementitious composites for solidification of this concentrate.

In the experiment, I created samples of eight different binder mixtures, each with two water coefficients. On them I investigated technological, rheological and mechanical properties. Then, I compared these samples to each other.

Keywords: *radioactive waste, cement composite, technological properties, rheological properties, mechanical properties*

Obsah

1. Úvod	8
2. Metody pro zpevnění a znehybnění kapalného odpadu	9
2.1. Bitumenace.....	9
2.2. Cementace	9
2.3. Vitřifikace	9
2.4. Polymerace	9
3. Pojiva použitá pro tento výzkum	10
3.1. CSA cement	10
3.2. Bezsádřovcový cement.....	10
3.3. Portlandský cement	10
3.4. Metakaolin.....	10
3.5. Křemičitý úlet.....	10
3.6. Struska.....	11
3.7. Zeolit	11
3.8. Směsi pojiv.....	11
4. Technologické vlastnosti	12
4.1. pH.....	12
4.2. Konzistence	12
4.3. Počátek a konec doby tuhnutí	13
4.4. Vyhodnocení	17
4.4.1. Střásací stolek	17
4.4.2. Počátek a konec doby tuhnutí	17
5. Reologické vlastnosti.....	18
5.1. Vzorky pro dilatace	19
5.2. Vlnovci.....	29
5.3. Vyhodnocení	32

5.3.1.	Měření dilatace	32
5.3.2.	Vlnovci.....	33
6.	Mechanické vlastnosti	34
6.1.	Pevnost v tahu ohybem	34
6.2.	Pevnost v tlaku	36
6.3.	Průběh měření	37
6.4.	Vyhodnocení	38
7.	Závěr.....	42
8.	Seznam literatury	43
9.	Seznam obrázků.....	45
10.	Seznam tabulek	45
11.	Seznam grafů	46

1. Úvod

Radioaktivní materiál je dnes hojně využíván mnoha obory, jako je například energetika, zdravotnictví, průmysl, zemědělství. To však s sebou přináší i problémy v podobě vznikajících radioaktivních odpadů. Tyto odpady mohou být pevného, kapalného i plynného skupenství. Pro každou z těchto forem jsou jiná specifika dalšího zacházení. Jedná se o nadnárodní problematiku, kterou je potřeba co nejdříve vyřešit. Jelikož spolupracuji s experimentálním centrem, které dostalo za úkol se touto problematikou zabývat a mě samotného to zajímá, vybral jsem si to jako téma této práce.

Kapalné odpady jako jsou kaly a koncentráty, je potřeba před uložením do úložišť radioaktivního odpadu zpevnit a znehybnit. Fixují se do bitumenů, cementů nebo polymerů. Vysoce aktivní odpady se pak virifikují. Hlavním cílem zpracování kapalných radioaktivních odpadů je takové snížení obsahu radionuklidů, aby bylo možné převážnou část těchto odpadů buď bezpečně vypustit do životního prostředí, nebo důležité složky z nich znovu použít.

Protože kyselina boritá výrazně prodlužuje tuhnutí běžných cementů, mým hlavním úkolem bylo vyzkoušet různé směsi několika pojiv a na vytvořených kompozitech zkoumat jejich chování. Pro tento výzkum jsem používal CSA cement, bezsádrovcový cement, portlandský cement, metakaolin, křemičitý úlet, zeolit, strusku v různých poměrech. Kompozity jsem vytvářel z cementových směsí a sklopisku Střeleč. Ten je zde pro získání co nejlepších adsorpčních vlastností, nikoli pro vytvoření „kostry“ jako v běžném betonu.

Pro každý vzorek jsem si předem namíchal koncentrát podle předepsaného složení. Aby se tento nasycený roztok plně rozpustil, bylo potřeba jej zahřát na 80 °C. Rozdíl oproti skutečnému byl v použití chloridu cesného, který díky jinému počtu elektronů nebyl radioaktivní, a proto jsem mohl tento výzkum provádět.

Nejdříve jsem míchal cementové pasty, na kterých jsem zjišťoval technologické vlastnosti. Následně jsem vytvářel zkušební tělesa z kompozitů. Na těch jsem z počátku zkoumal reologické a následně mechanické vlastnosti. Také jsem z kompozitů vytvářel vlnovce pro zkoumání objemových změn čerstvé směsi.

2. Metody pro zpevnění a znehybnění kapalného odpadu

2.1.Bitumenace

Metoda spočívá v odpaření kapaliny a rozmíchání suchého zbytku s roztaveným bitumenem nebo s bitumenovou emulzí. Bitumen je organická látka (živice) podobná asfaltu. Výhody této metody jsou v objemové redukci výsledného produktu a jeho nízká vyluhovatelnost ve vodě. Nevýhodou je hořlavost bitumenu, vyšší investiční náklady na zařízení, vyšší náročnost na obsluhu zařízení a jeho degradace v čase. [1]

2.2.Cementace

Metoda je založená na vázání vody, obsažené v kapalných radioaktivních odpadech, cementem. Kapalným radioaktivním odpadem se používá jako záměsová kapalina k výrobě betonových bloků. Výhody metody jsou v nehořlavosti výsledného produktu, nízké energetické náročnosti procesu a jednoduché technologii. Nevýhodou je významné zvětšení objemu výsledného produktu a vyšší vyluhovatelnost (v porovnání s bitumenací 10 až 100 krát). [2]

2.3.Vitrifikace

Metoda spočívá ve výrobě speciálních skel nebo sklokeramiky z kapalného radioaktivního odpadu a sklovitých materiálů při teplotě 900 až 1200 °C. Výhodou metody je velmi nízká vyluhovatelnost a vysoká objemová redukce výsledného produktu. Nevýhodou je nutnost využití poměrně složité technologie. [3]

2.4.Polymerace

Metoda spočívá v zabudování mokrých odpadů do umělých hmot, jako jsou polyester, vinylester nebo epoxidové pryskyřice. Jejich použití je však nesrovnatelně nákladnější a vyžaduje relativně složitá zařízení. Proto se tento proces používá jen tam, kde je zpevnění do cementu nebo bitumenu technicky nevhodné. Výhodou umělých hmot je velká odolnost vůči vyluhování radionuklidů a chemická netečnost. [4]

3. Pojiva použitá pro tento výzkum

3.1.CSA cement

Je calcium-sulfo-aluminátový (CSA) cement, s vysokým obsahem belitu. Při hydrataci vzniká ettringit, který se rozpíná, váže na sebe vodu a vyplňuje póry. Díky tomu se zvyšuje jeho hustota, počáteční pevnost, rychleji schne a je tím omezeno smršťování a propustnost. Dále produkuje menší hydratační teplo a je odolnější proti síranům. [5]

V experimentech je označován jako SAC.

3.2.Bezsádrovcový cement

Cement bez přidání sádrovce začne hydratovat ihned po přidání vody, díky tomu je urychleno tuhnutí a tvrdnutí. Je používán pro výrobu speciálních malt, nebo jako náhrada sádry.

V experimentech je označován jako N.

3.3.Portlandský cement

Je to nejčastěji používaný cement pro běžné betonování. Konkrétně se jednalo o CEM I 42,5 R.

V experimentech je označován jako P.

3.4.Metakaolin

Je získáván řízenými procesy tepelné a granulometrické úpravy jílovců a plavených kaolinů stabilního chemického složení. Jedná se o vysoce aktivní pucolány. V betonu zajišťuje nárůst pevnosti, zvýšení mrazuvzdornosti, teplotní a chemické odolnosti, odolnosti proti solím. Dále pak snižuje nasákavost, porozitu a výkvěty. [6]

V experimentech je označován jako M.

3.5.Křemičitý úlet

Vzniká jako odpad některých hutnických provozů a používá se jako příměs do betonu. Vyznačují se mimořádně velkým měrným povrchem. V betonu zvyšuje pevnost. [7]

V experimentech je označován jako K.

3.6.Struska

Struska vzniká při tavení železné rudy ve vysoké peci. Díky hydraulickým vlastnostem se přidává do cementu a v určitém množství ho může nahrazovat. [8]

V experimentech je označován jako S.

3.7.Zeolit

Zeolitické tuhy představují nejhojnější skupinu pucolánů, které se vyskytují v přírodě. Používá se jako příměs do betonu, zlepšuje tekutost směsi, vodotěsnost. Částečně může nahradit cement. [9]

V experimentech je označován jako Z.

3.8.Směsi pojiv

V rámci experimentu jsem zkoušel osm různých směsí pojiva, a to:

- SAC = 100 % SAC
- NP = 50 % N + 50 % P
- NM = 50 % N + 50 % M
- NS = 50 % N + 50 % S
- NK = 75 % N + 25 % K
- NZ = 50 % N + 50 % Z
- NKPM = 50 % N + 10 % K + 30 % P + 10 % M
- NKPZ = 50 % N + 10 % K + 30 % P + 10 % Z

Udáváno v procentech hmotnosti

U každé směsi jsem použil dva vodní součinitele, a to:

- 0,4
- 0,5

4. Technologické vlastnosti

Technologické vlastnosti cementových kompozitů jsou takové, které zjišťujeme, abychom věděli, jak se s danou směsí pracuje do té doby, dokud směs neztuhne. Pro tuto práci jsem zjišťoval vlastnosti cementových past osmi různých kombinací, každá s dvěma vodními součiniteli (dle zadání). Konkrétně se jednalo o vlastnosti:

- pH
- konzistence
- počátek a konec doby tuhnutí

4.1.pH

pH, neboli vodíkový exponent, je číslo, kterým v chemii vyjadřujeme, zda vodný roztok reaguje kyselé či naopak zásaditě. Jedná se o logaritmickou stupnici s rozsahem hodnot od 0 do 14, přitom neutrální voda má pH při standardních podmínkách rovno 7. U kyselin je pH menší než sedm – čím menší číslo, tím „silnější“ kyselina; naopak zásady mají $\text{pH} > 7$, čím větší číslo, tím „silnější“ zásada. [10]

Na vzorcích jsem pH měřil pomocí elektrického pH metru Essentials.



Obrázek č. 1: Essentials pH metr

4.2.Konzistence

Konzistenci cementových past jsem stanovoval zkouškou dle normy: ČSN EN 1015-3 - Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Zkouška spočívá v tom, že definovaný kužel, který je umístěn na navlhčeném střešacím stolku, naplníme čerstvou směsí. Kužel odebereme

a následně necháme směs 15x setřást. Poté změříme dva na sebe kolmé průměry vzniklého „koláče“. [11]



Obrázek č. 2: Strásací stolek

4.3. Počátek a konec doby tuhnutí

Počátek a konec doby tuhnutí jsem stanovoval dle normy: ČSN EN 196-3 - *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Tyto časy se počítají od doby vmíchání vody do suché směsi – začátku hydratace cementu. Tyto hodnoty jsem stanovoval na elektronickém a zároveň ultrazvukovém Vicatově přístroji.

Elektrický přístroj (mechanický) používá jehlu a sám si udržuje časový interval a změnu místa pro průnik jehly. Rozmíchaná pasta se dá do definované formy, zalije vodou, aby nevysychala na vzduchu, a nechá se do ní vnikat jehla v určitém časovém intervalu, vždy do jiného místa. Počátkem doby tuhnutí se rozumí čas, kdy se jehla zastaví přibližně 6 mm nad dnem nádoby se směsí. Koncem doby tuhnutí se rozumí čas, kdy se jehla zabodne do vzorku maximálně 0,5 mm. Tyto hodnoty přístroj automaticky zaznamenává na papír. [12]

Ultrazvukový přístroj (Vikasonic) mění dobu průchodu ultrazvukové vlny (přenosový čas), která se mění v závislosti na tuhnutí pasty. Vikasonic měří dobu průchodu

ultrazvuku a tlumení signálu ve stanovených časových intervalech s krokem 60 s. Dále se vypočítává rychlost zvukového signálu a modul pružnosti podle vzorce:

$$v = s/t \qquad E = \rho \cdot v^2$$

kde: v je rychlost vlny [m/s]

s je délka vlny [m]

t je přenosový čas [s]

E je modul pružnosti [MPa]

ρ je objemová hmotnost vzorku [kg/m^3]

Přístroj zároveň měří teplotu uvnitř vzorku. Datové soubory jsou zaznamenány digitálně na USB flashdisk. [13]



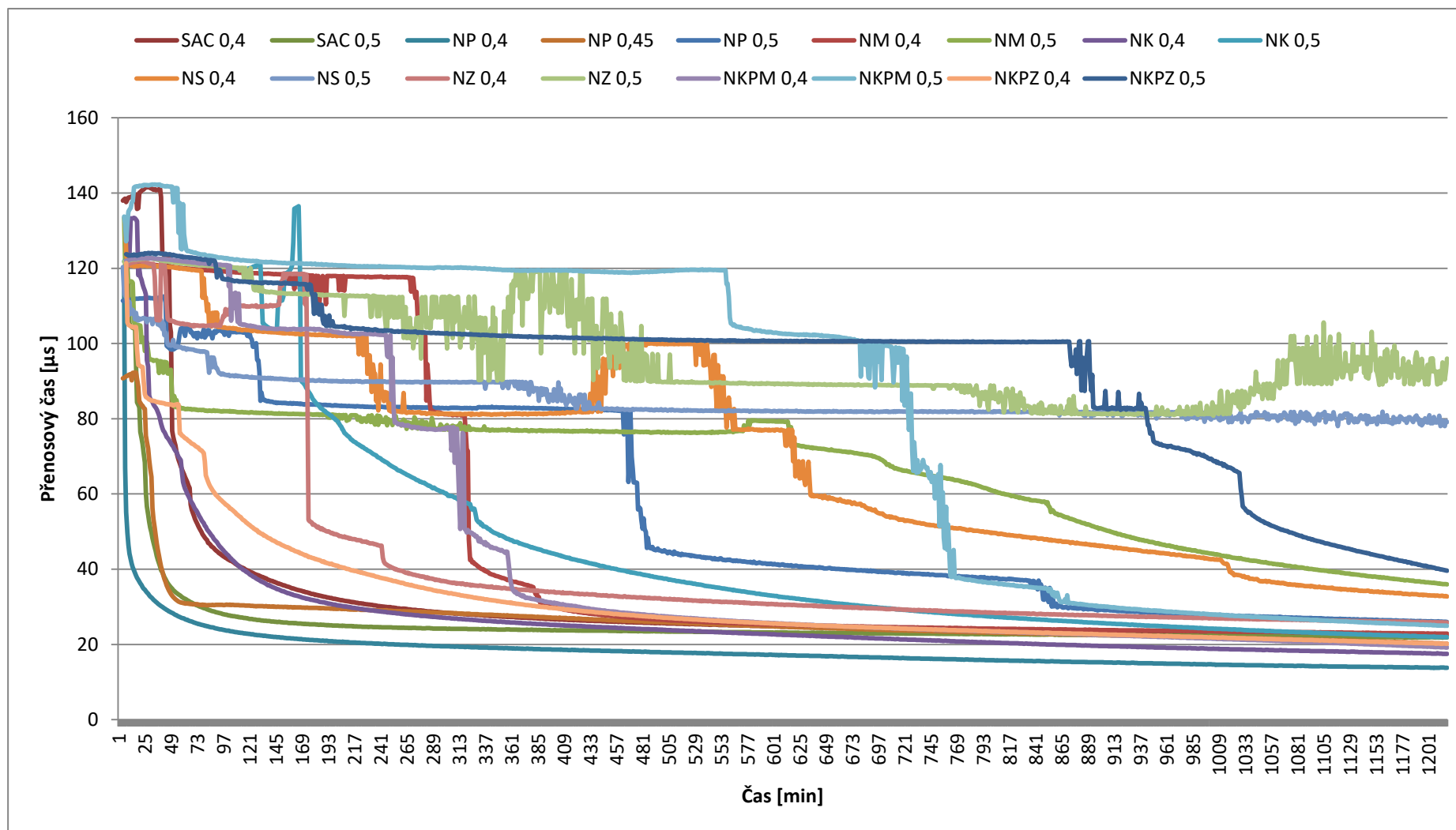
Obrázek č. 3: Elektronický Vicatův přístroj



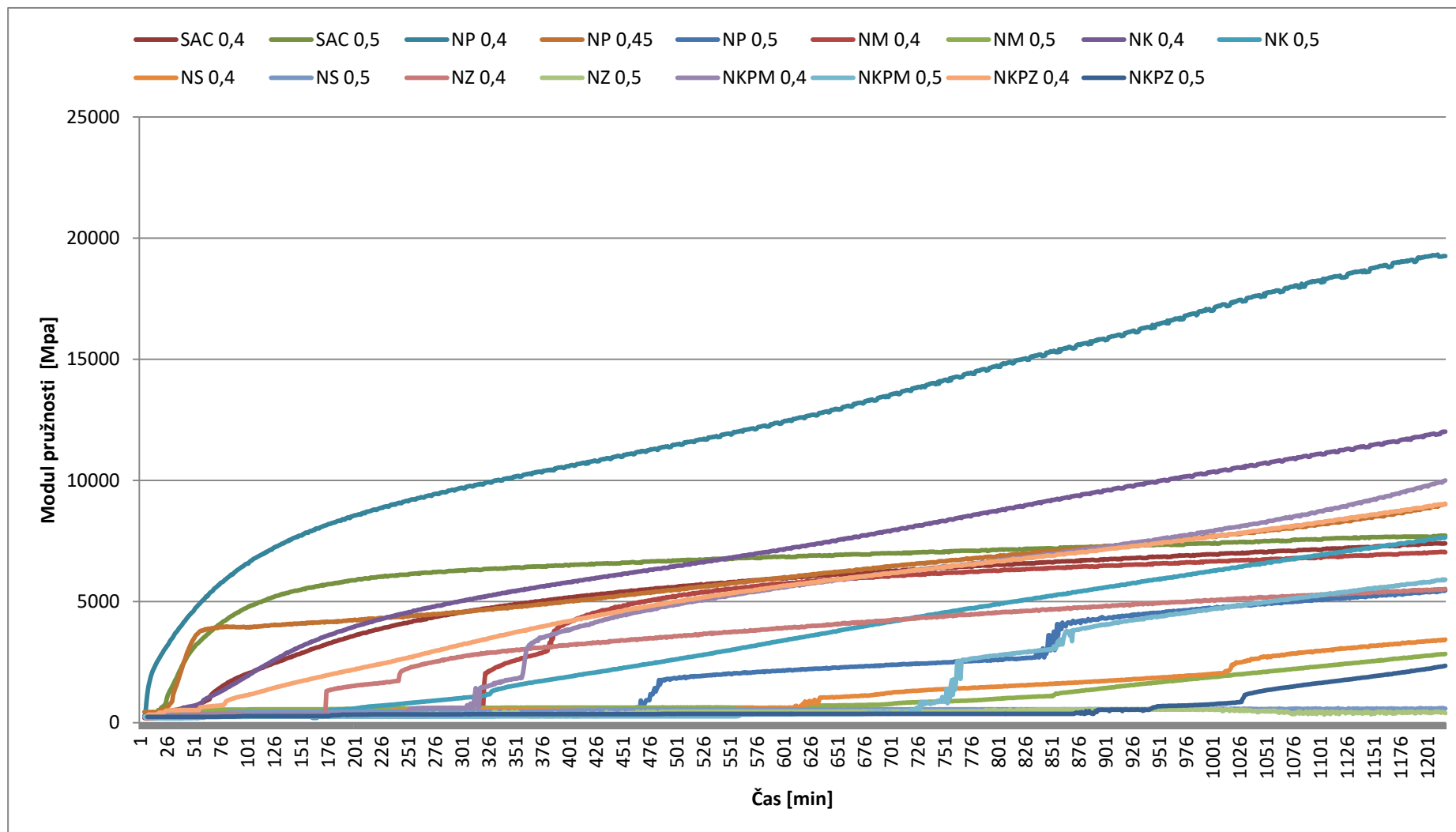
Obrázek č. 4: Ultrazvukový Vicatův přístroj (Vikasonic)

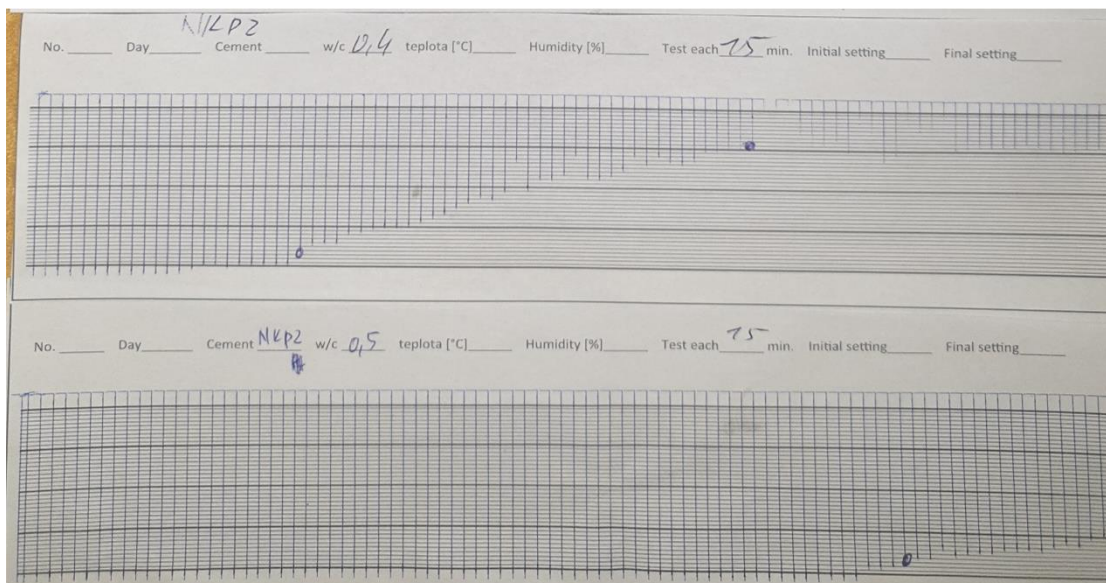
Z hodnot jsem vytvořil grafy průběhu tuhnutí jednotlivých vzorků v prvních dvaceti hodinách ze záznamů ultrazvukového Vicatova přístroje.

Graf č. 1: Srovnání průběhů přenosových časů v prvních deseti hodinách



Graf č. 2: Srovnání průběhů modulů pružnosti v prvních deseti hodinách





Obrázek č. 5: Záznam elektronického Vicatova přístroje

4.4. Vyhodnocení

4.4.1. Střásací stolek

U vzorků, jejichž konzistence dovolila použití této metody, jsem následně dva změřené, na sebe kolmé rozměry, zprůměroval. Tento rozměr je pak výsledek zkoušky. Příliš tekuté směsi, u kterých bylo zjevné, že by se roztekly více, než je rozměr stolku, jsem prohlásil za „tekuté“. Vzorek NP – 0,4 byl již při domíchání natolik tuhý, že už tato metoda neměla smysl, proto jsem ho prohlásil za „tuhý“, NP – 0,5 byl ale naopak příliš tekutý, proto jsem pak vytvořil navíc vzorek s vodním součinitelem 0,45. Výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 1.

4.4.2. Počátek a konec doby tuhnutí

Počátek a konec doby tuhnutí ultrazvukovým měřením jsem zjišťoval z průběhu křivky přenosového času – změna křivosti = počátek/konec doby tuhnutí.

Hodnoty obou typů měření jsem mezi sebou porovnal. U vzorků, jejichž výsledky se rozcházely, jsem použil hodnoty z elektronického přístroje. U těch, kde tento přístroj nezaznamenal celý průběh, jsem použil hodnoty z ultrazvukového, i v tomto případě však z časových důvodů nemám všechny hodnoty. V grafu č. 18 je pak vidět srovnání průběhů tuhnutí jednotlivých vzorků.

Tabulka č. 1: Výsledky technologických zkoušek

směs cementu	vodní součinitel	pH	rozliv [cm]	počátek doby tuhnutí [min]	konec doby tuhnutí [min]
SAC	0,4	11,9	16,75	15	118
	0,5	12,3	19,6	95	153
NP	0,4	13,2	TUHÉ	14	58
	0,45	13,3	TEKUTÉ	54	179
	0,5	13,3	TEKUTÉ	468	861
NM	0,4	13,1	21,5	322	447
	0,5	13,1	TEKUTÉ	622	854
NK	0,4	13,2	12	184	735
	0,5	13,3	17,25	615	855
NS	0,4	13,3	25	677	1019
	0,5	13	TEKUTÉ	1170	NEZJIŠTĚNO
NZ	0,4	12,8	16	608	998
	0,5	12,9	22	1009	NEZJIŠTĚNO
NKPM	0,4	12,9	15,5	360	735
	0,5	12,9	19,5	710	886
NKPZ	0,4	12,9	14,5	338	900
	0,5	13	20	1020	NEZJIŠTĚNO

5. Reologické vlastnosti

Reologické vlastnosti (dotvarování a smršťování) čerstvého betonu jsou jedním z určujících faktorů pro jeho další použití a zásadně ovlivňují vlastnosti zatvrdlých betonů. Jsou závislé na celé řadě proměnných, jakými jsou vodní součinitel, typ a množství cementu, plastifikační přísady, kameniva (granulometrie směsi kameniva, tvarový index, původ kameniva), příměsi, teplota betonu a okolního prostředí a v neposlední řadě doba od namíchání do zpracování. [14]

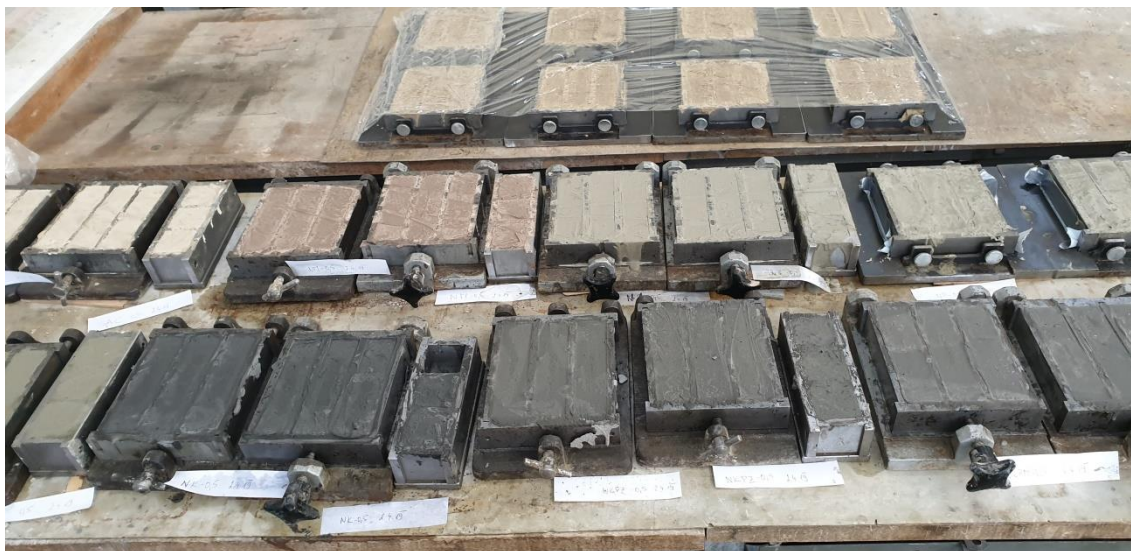
Pro zjištění těchto vlastností v rámci tohoto projektu, jsem vytvářel zkušební vzorky s rozměry 40x40x160 mm pro měření dilatací na již zatvrdlých vzorcích a „vlnovce“, tj. vzorky pro měření průběhu objemových změn během tuhnutí a tvrdnutí v pružných formách umožňujících změnu objemu, a to na osmi cementových kompozitech (viz zadání). Jako kamenivo jsem použil sklopísek Střeleč různých frakcí. Navážku jsem dělal podle tabulky č. 2.

Tabulka č. 2: Granulometrie a navážky

w/c = 0,5						
ST 02/06	ST 03/08	ST 06/12	ST2	Pojivo	Voda	
90,23	112,79	135,34	112,79	902,29	451,14	kg/m ³
w/c = 0,4						
ST 02/06	ST 03/08	ST 06/12	ST2	Pojivo	Voda	
94,35	117,93	141,52	117,93	1010,87	404,35	kg/m ³

5.1. Vzorčky pro dilatace

Vytvořil jsem vždy dvě sady (sada jsou tři zkušební tělesa). Navážku kameniva jsem dělal podle tabulky č. 3.



Obrázek č. 6: Vytváření zkušebních těles

Tato zkušební tělesa jsem po dvou dnech (po zatuhnutí) odbednil, popsal, změřil, zvážil a nalepil terčíky na začátek a konec vzorku. Následně jsem je rozdělil do dvou skupin (podle sad) – první sada s označením 1, 2, 3 jsem vložil do komory s konstantní vlhkostí 75 %. Druhá sada vzorků s označením 4, 5, 6 zůstala vystavena běžnému okolnímu prostředí. Každý den, po dobu 26 dní (28 dní od začátku tuhnutí), jsem pak měřil změnu délky (dilataci) a změnu váhy jednotlivých vzorků. Dilatace jsem zjišťoval pomocí dvou laserových měřidel, pevně připevněných na kovovou konstrukci, které mířily na terčíky na vzorcích. Dva rozměry s přesností na tisícinu milimetru jsem zprůměroval. Následně jsem z těchto průměrů jednotlivých těles vytvořil průměr pro každou sadu a od této

hodnoty jsem odečetl hodnotu z prvního dne měření. Tím jsem zjistil změnu délky vzorku. Tyto délky jsem poté podělil jejich počáteční délkou (0,16 m), abych dostal hodnoty dilatace v mm/m. Tímto způsobem jsem postupoval i u měření hmotnosti. Z těchto hodnot jsem pak vytvořil jednotlivé tabulky a jim odpovídající grafy průběhu změny délky a hmotnosti.

Kladná hodnota udává nárůst, záporná zmenšení délky (hmotnosti).



Obrázek č. 7: Měření dilatací

Tabulka č. 3: Dilatace $w/c = 0,5$ [mm/m]

Vzorek	Prostředí	Počet dnů od odbednění													
		0	1	4	5	6	8	11	13	14	19	20	22	26	28
SAC	RH 75 %	0,000	-0,072	-0,041	-0,049	-0,083	-0,090	-0,228	-0,148	-0,163	-0,220	-0,216	-0,249	-0,244	-0,172
	VZDUCH	0,000	-0,046	-0,105	-0,135	-0,159	-0,176	-0,215	-0,244	-0,304	-0,297	-0,298	-0,304	-0,333	-0,350
NP	RH 75 %	0,000	-0,006	0,012	0,012	0,000	-0,022	-0,049	-0,073	-0,065	-0,143	-0,145	-0,170	-0,213	-0,201
	VZDUCH	0,000	0,001	0,020	-0,005	-0,038	-0,093	-0,190	-0,248	-0,318	-0,424	-0,439	-0,477	-0,561	-0,606
NM	RH 75 %	0,000	-0,308	-0,307	-0,352	-0,386	-0,441	-0,520	-0,542	-0,532	-0,617	-0,642	-0,662	-0,695	-0,695
	VZDUCH	0,000	-0,157	-0,424	-0,481	-0,530	-0,605	-0,718	-0,745	-0,828	-0,934	-0,945	-0,979	-1,040	-1,068
NS	RH 75 %	0,000	0,083	0,043	0,020	-0,019	-0,063	-0,165	-0,211	-0,148	-0,191	-0,084	-0,126	-0,219	-0,243
	VZDUCH	0,000	0,062	-0,230	-0,309	-0,414	-0,578	-0,807	-0,925	-0,974	-1,178	-1,198	-1,251	-1,359	-1,397
NK	RH 75 %	0,000	0,104	-0,053	-0,109	-0,183	-0,283	-0,416	-0,452	-0,486	-0,553	-0,567	-0,590	-0,662	-0,644
	VZDUCH	0,000	0,103	-0,240	-0,374	-0,468	-0,619	-0,849	-0,943	-1,032	-1,211	-1,254	-1,302	-1,417	-1,454
NZ	RH 75 %	0,000	-0,322	-0,421	-0,438	-0,498	-0,862	-0,966	-1,016	-1,034	-1,118	-1,151	-1,163	-1,206	-1,215
	VZDUCH	0,000	-0,246	-0,869	-1,001	-1,095	-1,421	-1,765	-1,975	-1,982	-2,418	-2,489	-2,580	-2,756	-2,566
NKPM	RH 75 %	0,000	0,038	-0,108	-0,138	-0,161	-0,247	-0,295	-0,319	-0,326	-0,381	-0,387	-0,413	-0,456	-0,398
	VZDUCH	0,000	-0,089	-0,337	-0,389	-0,419	-0,486	-0,597	-0,653	-0,701	-0,792	-0,817	-0,835	-0,894	-0,778
NKPZ	RH 75 %	0,000	-0,176	-0,324	-0,352	-0,381	-0,439	-0,521	-0,570	-0,582	-0,657	-0,665	-0,705	-0,739	-0,476
	VZDUCH	0,000	-0,217	-0,531	-0,605	-0,657	-0,651	-0,930	-0,987	-1,039	-1,233	-1,263	-1,300	-1,407	-1,252

Tabulka č. 4: Dilatace $w/c = 0,4$ [mm/m]

Vzorek	Prostředí	Počet dnů od odbednění											
		0	1	2	4	7	9	10	15	16	18	22	24
SAC	RH 75 %	0,000	-0,218	-0,232	-0,267	-0,265	-0,267	-0,272	-0,281	-0,310	-0,297	-0,277	-0,271
	VZDUCH	0,000	0,014	-0,064	-0,075	-0,109	-0,167	-0,171	-0,211	-0,226	-0,215	-0,229	-0,260
NP	RH 75 %	0,000	-0,006	-0,028	-0,102	-0,180	-0,225	-0,172	-0,288	-0,299	-0,311	-0,374	-0,408
	VZDUCH	0,000	-0,043	-0,099	-0,185	-0,349	-0,450	-0,449	-0,675	-0,723	-0,772	-0,905	-0,964
NM	RH 75 %	0,000	-0,019	-0,019	-0,157	-0,208	-0,250	-0,273	-0,340	-0,370	-0,396	-0,425	-0,217
	VZDUCH	0,000	-0,071	-0,106	-0,173	-0,267	-0,318	-0,280	-0,443	-0,485	-0,488	-0,555	-0,269
NS	RH 75 %	0,000	-0,029	-0,099	-0,223	-0,353	-0,417	-0,450	-0,551	-0,597	-0,619	-0,667	-0,661
	VZDUCH	0,000	-0,115	-0,215	-0,359	-0,556	-0,645	-0,690	-0,872	-0,878	-0,946	-1,044	-1,098
NK	RH 75 %	0,000	-0,081	-0,132	-0,219	-0,419	-0,499	-0,619	-0,626	-0,671	-0,678	-0,716	-0,733
	VZDUCH	0,000	-0,168	-0,277	-0,495	-0,794	-0,928	-0,964	-1,190	-1,229	-1,270	-1,357	-1,392
NZ	RH 75 %	0,000	-0,063	-0,115	-0,201	-0,273	-0,230	-0,226	-0,449	-0,436	-0,453	-0,488	-0,433
	VZDUCH	0,000	-0,084	-0,306	-0,463	-0,635	-0,679	-0,751	-0,917	-0,951	-1,019	-1,075	-1,106
NKPM	RH 75 %	0,000	-0,023	-0,032	-0,106	-0,106	-0,173	-0,182	-0,234	-0,241	-0,249	-0,283	-0,241
	VZDUCH	0,000	-0,090	-0,156	-0,234	-0,326	-0,376	-0,403	-0,511	-0,522	-0,556	-0,605	-0,637
NKPZ	RH 75 %	0,000	-0,033	-0,068	-0,158	-0,206	-0,274	-0,253	-0,328	-0,341	-0,354	-0,396	-0,340
	VZDUCH	0,000	-0,112	-0,212	-0,324	-0,458	-0,544	-0,367	-0,752	-0,760	-0,817	-0,929	-0,989

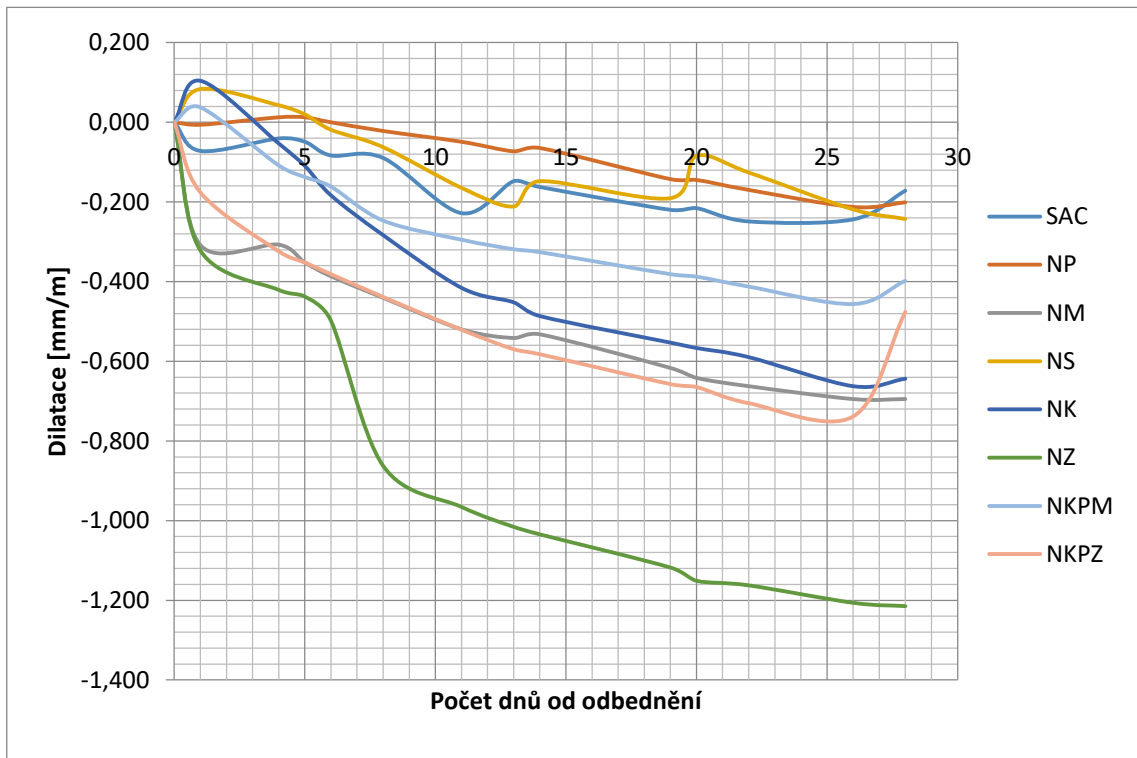
Tabulka č. 5: Změna hmotnosti $w/c = 0,5$ [g/kg]

Vzorek	Prostředí	Počet dnů od odbednění													
		0	1	4	5	6	8	11	13	14	19	20	22	26	28
SAC	RH 75 %	0,000	0,639	3,831	3,831	4,470	5,109	5,747	5,747	6,386	7,024	7,024	7,024	8,301	8,940
	VZDUCH	0,000	-0,646	0,000	0,000	0,646	-0,646	-0,646	-0,646	-0,646	-0,646	-0,646	-0,646	-0,646	-0,646
NP	RH 75 %	0,000	0,640	0,640	0,000	-0,640	-1,921	-3,841	-3,841	-4,481	-5,122	-5,762	-5,762	-6,402	-7,042
	VZDUCH	0,000	-6,337	-8,238	-9,506	-10,773	-13,308	-16,477	-18,378	-19,011	-21,546	-22,814	-23,447	-24,081	-25,982
NM	RH 75 %	0,000	-2,613	-3,919	-4,572	-4,572	-5,225	-6,532	-7,185	-7,185	-8,491	-9,144	-9,144	-9,798	-9,798
	VZDUCH	0,000	-5,242	-22,936	-25,557	-27,523	-32,110	-38,008	-39,974	-40,629	-46,527	-47,182	-48,493	-50,459	-50,459
NS	RH 75 %	0,000	-3,911	-7,823	-8,475	-9,126	-10,430	-11,734	-11,734	-11,734	-11,734	-12,386	-11,734	-13,038	-13,038
	VZDUCH	0,000	-10,444	-44,386	-47,650	-50,261	-54,830	-60,705	-62,663	-63,969	-67,232	-67,885	-67,885	-69,191	-69,843
NK	RH 75 %	0,000	-1,967	-3,279	-3,279	-3,934	-4,590	-5,902	-5,902	-7,213	-7,213	-7,869	-7,869	-8,525	-9,180
	VZDUCH	0,000	-1,956	-14,342	-16,297	-18,253	-24,120	-28,683	-31,291	-31,943	-36,506	-37,158	-38,462	-39,113	-40,417
NZ	RH 75 %	0,000	-4,730	-14,189	-14,865	-15,541	-17,568	-18,243	-18,243	-19,595	-20,270	-20,270	-20,946	-20,946	-21,622
	VZDUCH	0,000	-14,218	-61,611	-65,674	-69,736	-76,506	-83,954	-87,339	-89,370	-95,464	-96,141	-97,495	-98,849	-98,849
NKPM	RH 75 %	0,000	-1,975	-1,975	-1,975	-1,975	-3,292	-3,950	-3,950	-3,950	-3,950	-3,950	-4,608	-5,267	-5,925
	VZDUCH	0,000	-4,578	-8,502	-8,502	-9,156	-11,118	-13,734	-14,388	-15,043	-16,351	-17,005	-18,313	-18,967	-19,621
NKPZ	RH 75 %	0,000	-1,946	-1,946	-2,594	-2,594	-3,891	-3,891	-3,891	-4,540	-5,188	-5,188	-5,188	-5,837	-5,837
	VZDUCH	0,000	-3,911	-9,778	-10,430	-11,734	-14,993	-17,601	-19,557	-20,860	-23,468	-23,468	-23,468	-25,424	-26,076

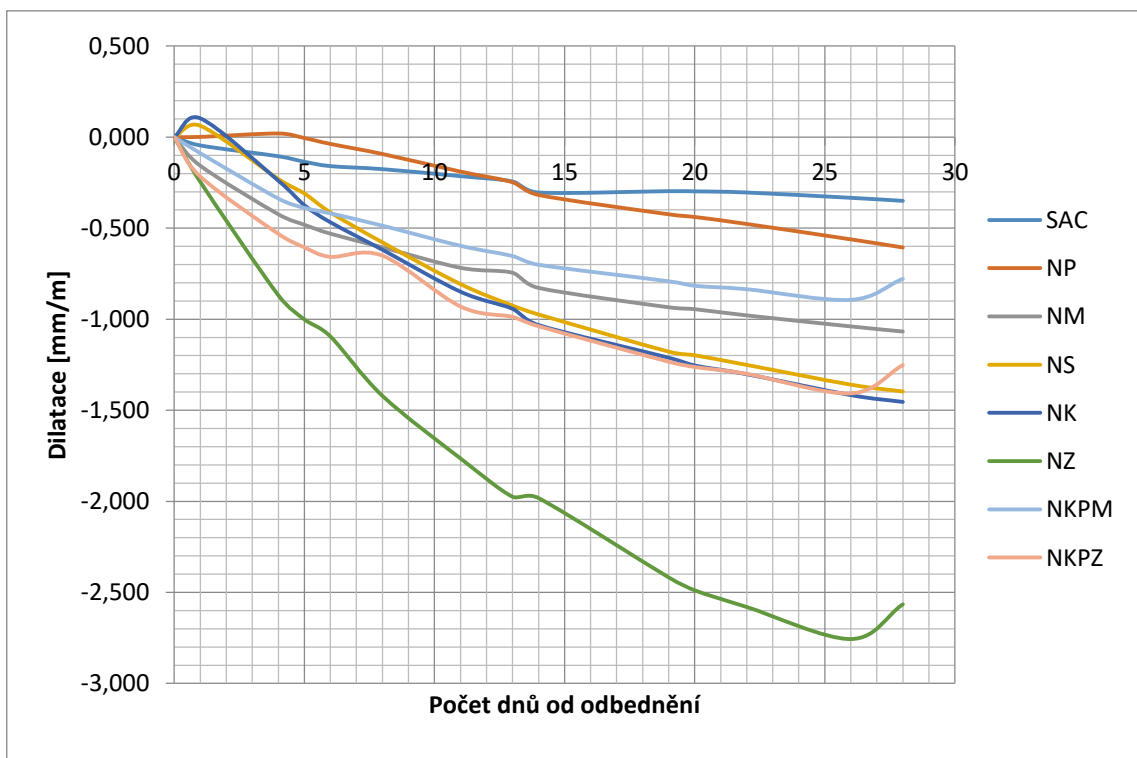
Tabulka č. 6: Změna hmotností $w/c = 0,4$ [g/kg]

Vzorek	Prostředí	Počet dnů od odbednění											
		0	1	2	4	7	9	10	15	16	18	22	24
SAC	RH 75 %	0,000	0,623	1,246	2,492	3,115	3,738	4,361	4,984	5,607	6,231	6,231	6,231
	VZDUCH	0,000	-0,625	-0,625	-1,250	-1,250	-1,875	-1,875	-1,875	-1,875	-1,875	-1,875	-2,500
NP	RH 75 %	0,000	0,000	-0,609	-0,609	-1,218	-1,827	-1,827	-1,827	-2,436	-2,436	-2,436	-2,436
	VZDUCH	0,000	-1,221	-1,832	-3,053	-4,274	-5,495	-6,105	-7,937	-7,937	-7,937	-8,547	-9,158
NM	RH 75 %	0,000	-0,641	-1,281	-1,281	-1,922	-2,562	-3,203	-3,203	-3,203	-3,844	-5,125	-4,484
	VZDUCH	0,000	-2,548	-2,548	-4,459	-7,006	-8,280	-8,280	-10,191	-11,465	-12,102	-13,376	-14,013
NS	RH 75 %	0,000	-1,249	-1,249	-2,498	-3,123	-3,123	-3,748	-3,123	-3,748	-3,748	-3,123	-3,748
	VZDUCH	0,000	-6,845	-10,579	-16,179	-20,535	-23,024	-23,024	-27,380	-27,380	-28,002	-29,247	-29,247
NK	RH 75 %	0,000	-0,637	-0,637	-0,637	-2,548	-2,548	-1,911	-2,548	-2,548	-2,548	-3,185	-4,459
	VZDUCH	0,000	-2,551	-3,827	-6,378	-9,566	-10,842	-12,755	-14,031	-14,031	-14,031	-15,306	-15,944
NZ	RH 75 %	0,000	-1,992	-1,992	-2,656	-3,320	-3,984	-3,984	-4,648	-4,648	-4,648	-4,648	-4,648
	VZDUCH	0,000	-6,527	-10,444	-15,666	-20,888	-23,499	-23,499	-28,068	-28,721	-30,026	-31,984	-31,984
NKPM	RH 75 %	0,000	0,629	-0,629	-0,629	-0,629	-0,629	-0,629	-1,887	-1,887	-1,887	-2,516	-2,516
	VZDUCH	0,000	-3,086	-4,938	-9,877	-14,198	-16,049	-16,049	-19,753	-20,370	-20,988	-21,605	-22,222
NKPZ	RH 75 %	0,000	0,000	0,000	0,000	-1,874	-1,249	-1,874	-1,874	-1,874	-2,498	-3,123	-3,123
	VZDUCH	0,000	-5,122	-8,323	-12,804	-17,286	-19,206	-21,127	-24,968	-24,968	-25,608	-27,529	-28,809

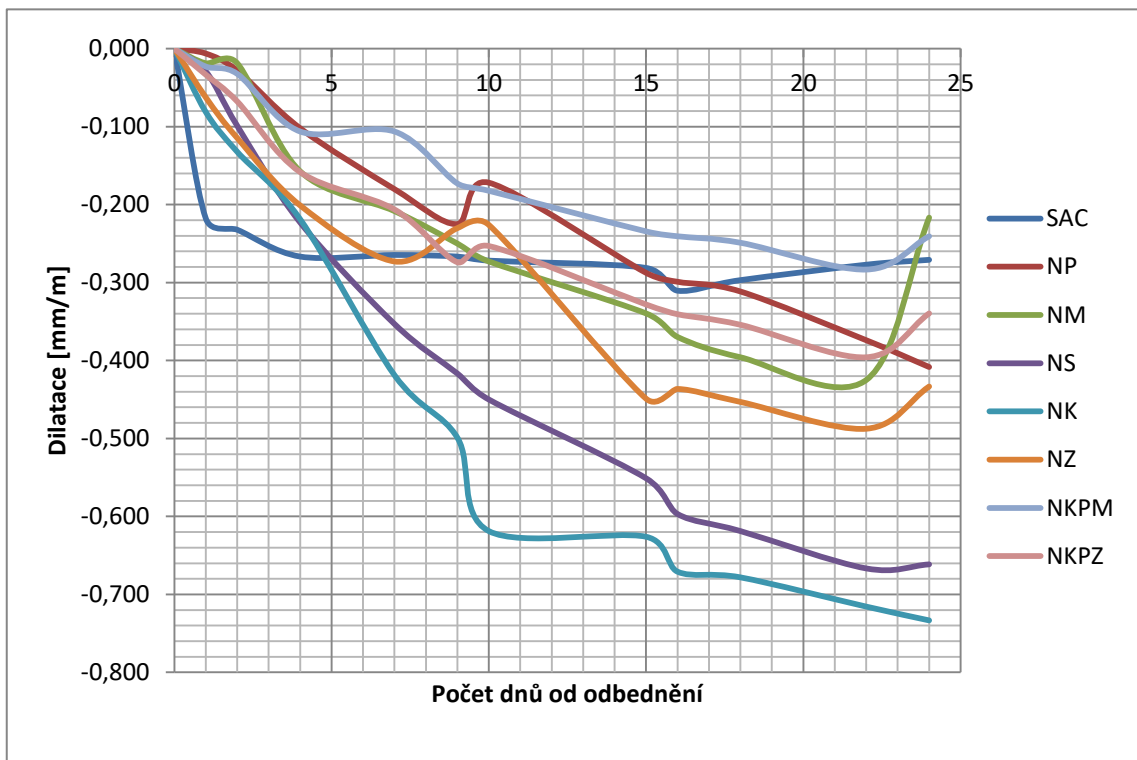
Graf č. 3: Dilatace, $w/c = 0,5$, $RH = 75\%$



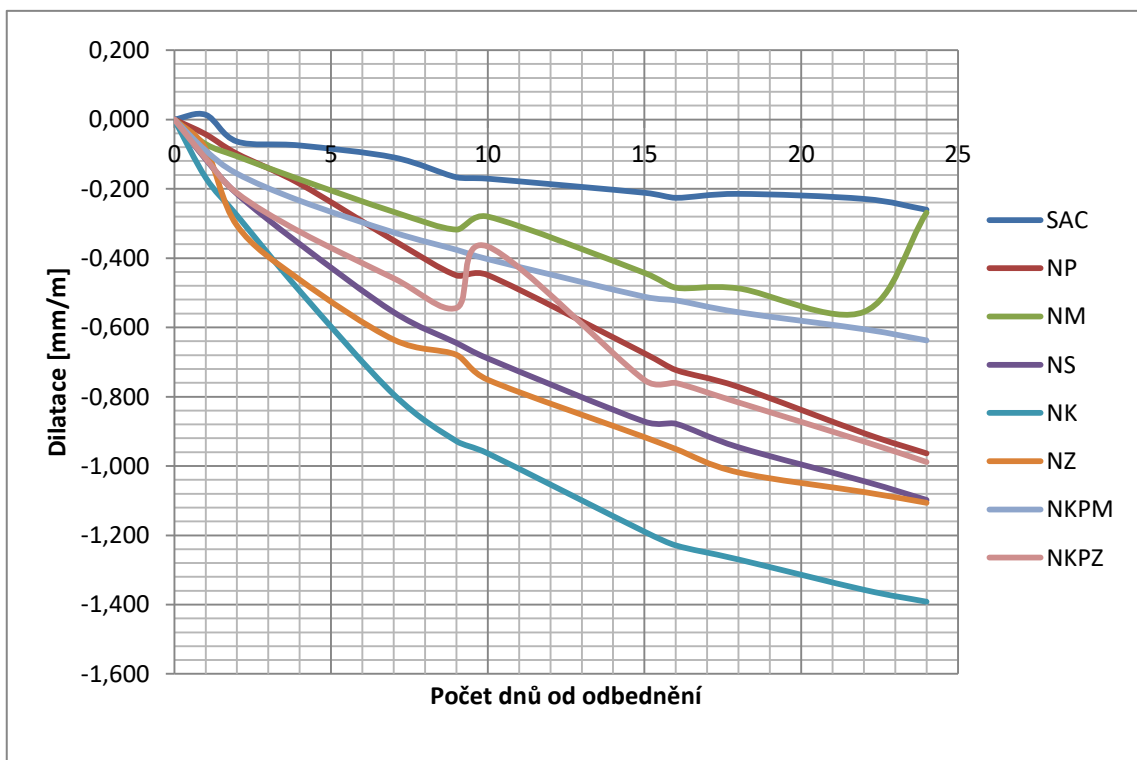
Graf č. 4: Dilatace, $w/c = 0,5$, na vzduchu



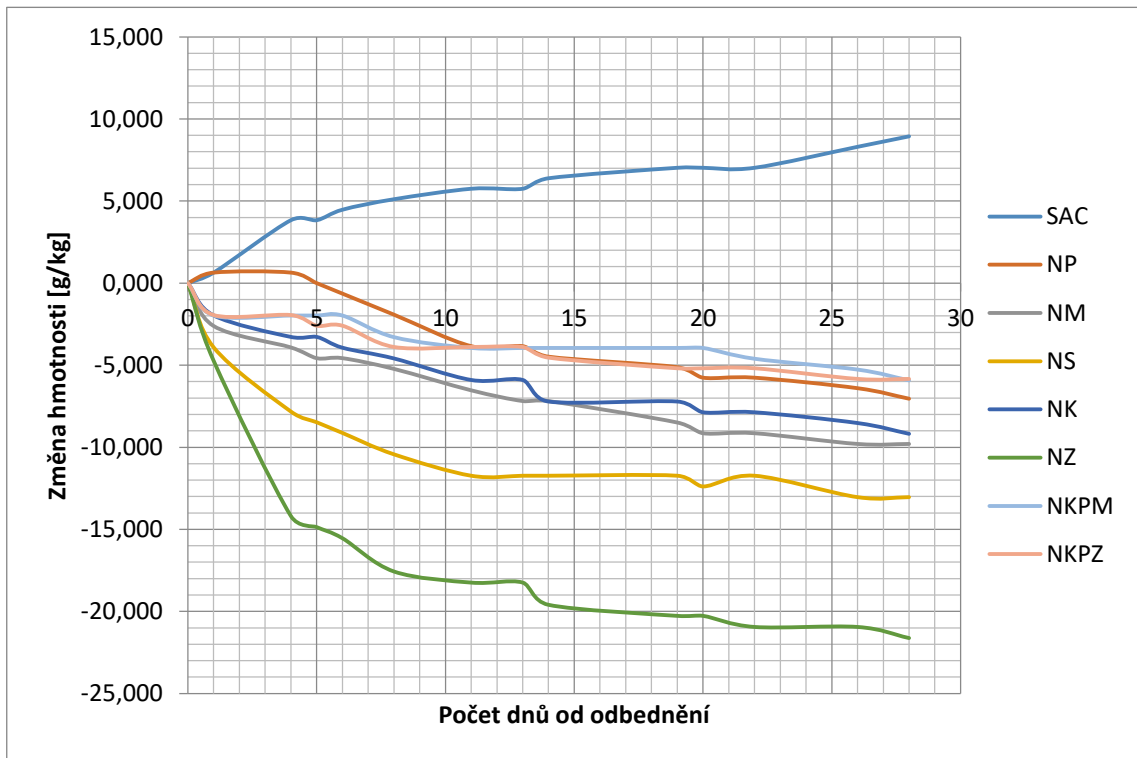
Graf č. 5: Dilatace, $w/c = 0,4$, $RH = 75\%$



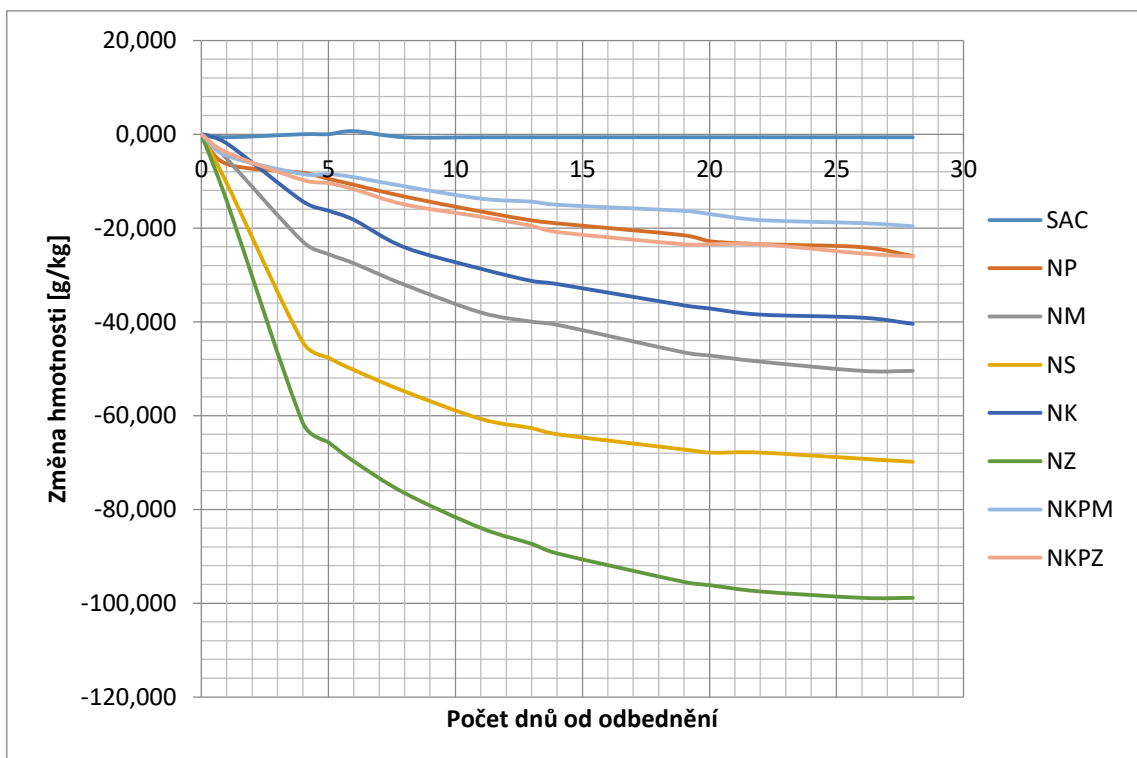
Graf č. 6: Dilatace, $w/c = 0,4$, na vzduchu



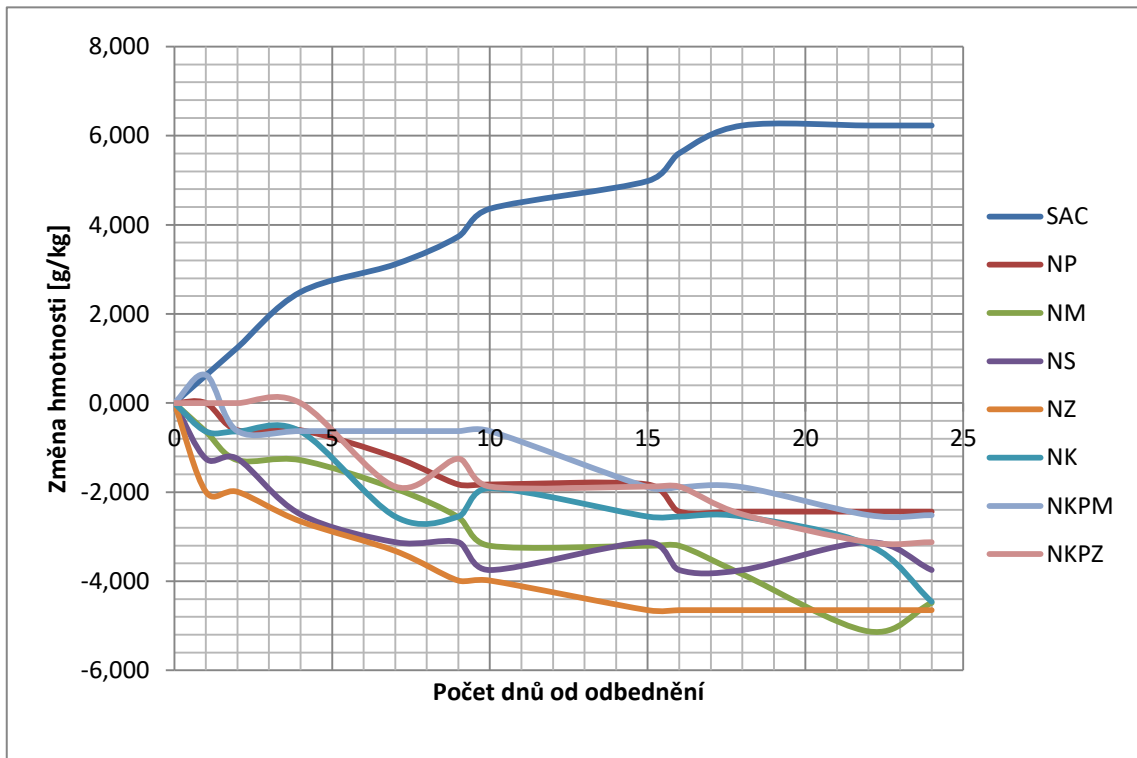
Graf č. 7: Změna hmotnosti, $w/c = 0,5$, $RH = 75 \%$



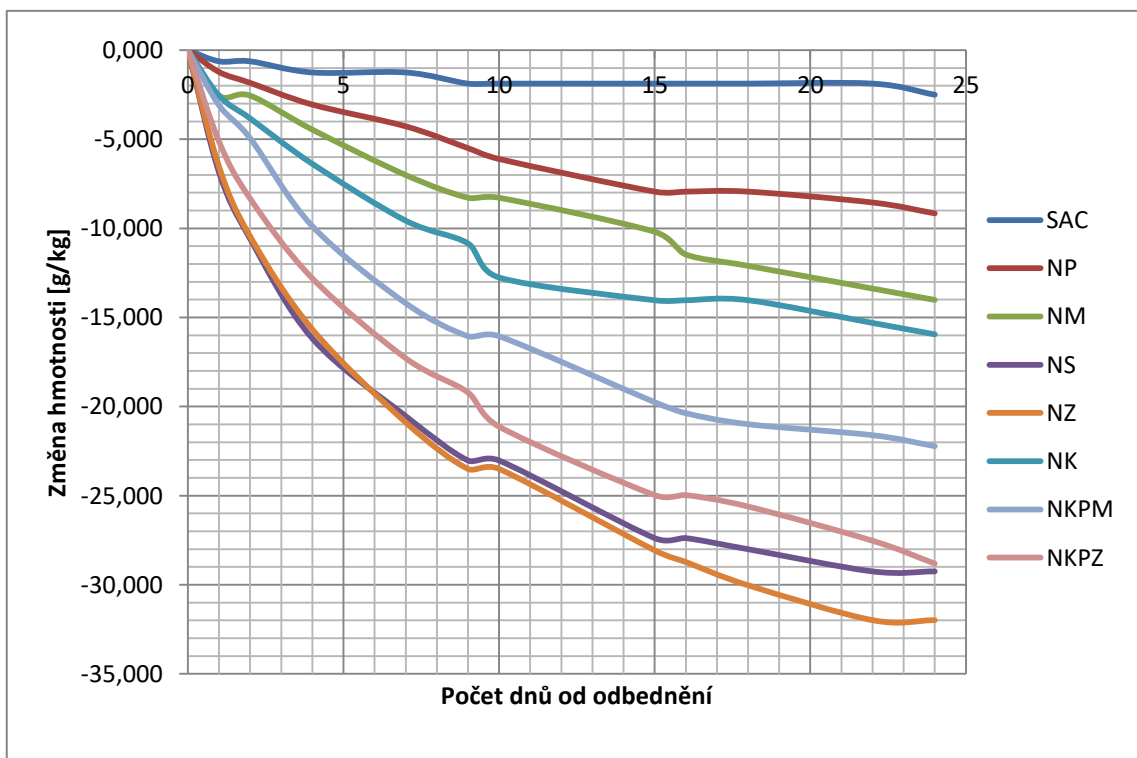
Graf č. 8: Změna hmotnosti, $w/c = 0,5$, na vzduchu



Graf č. 9: Změna hmotnosti, $w/c = 0,4$, $RH = 75 \%$



Graf č. 10: Změna hmotnosti, $w/c = 0,4$, na vzduchu



5.2. Vlnovci

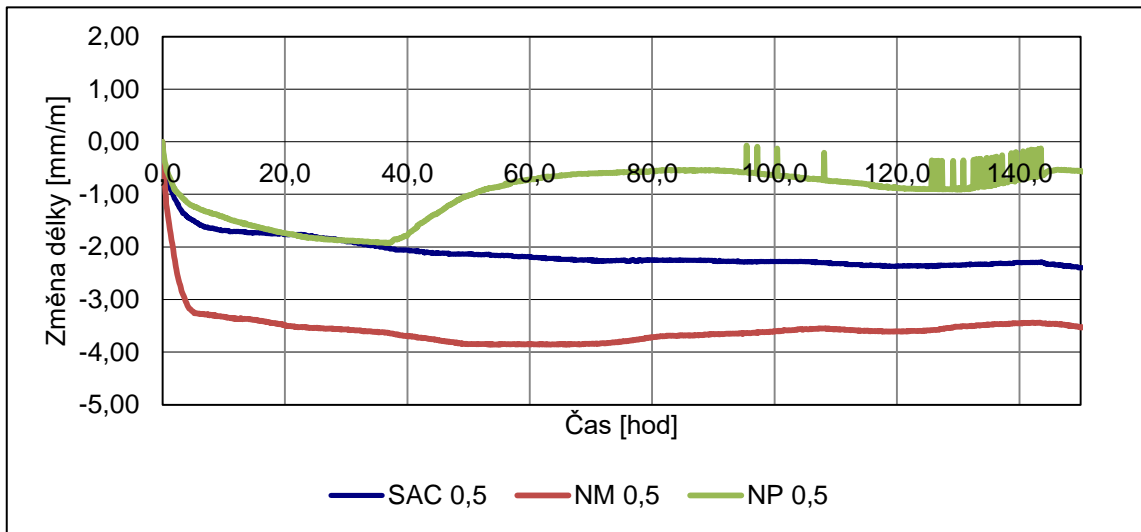
Z každého cementového kompozitu jsem také vytvořil jednoho takzvaného vlnovce. Jedná se o gumovou formu vlnitého tvaru, která díky své minimální tuhosti ve svislém směru neovlivní hodnoty objemové změny čerstvé betonové směsi. Tuto formu jsem naplnil kompozitem a ihned vložil do klima komory, kde se za stálé teploty a vlhkosti, po dobu jednoho týdne, zaznamenávaly deformace každých 5 minut. Tyto hodnoty jsem pak podělil výškou vlnovce (0,16 m), abych zjistil hodnoty deformace v mm/m. Z těchto čísel jsem pak vytvořil grafy průběhů deformací.



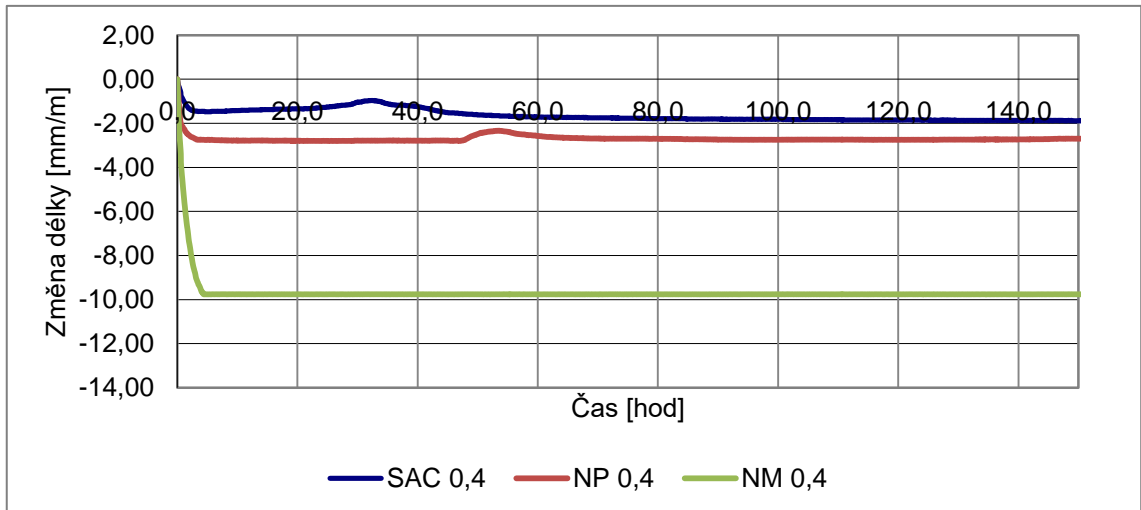
Obrázek č. 8: Vlnovci

K dispozici jsem měl jednu klima komoru, do které se vešli tři vlnovci, takže jsem vytvořil čtyřikrát tři a dvakrát dva vzorky. Tyto skupinky jsem pak dával do jednoho grafu.

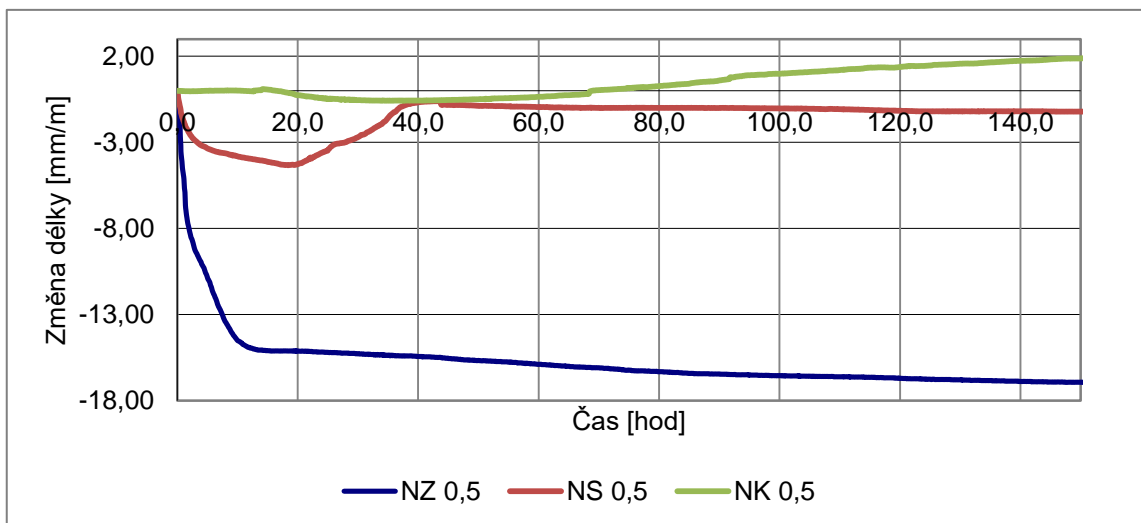
Graf č. 11 Deformace vlnovců, 1. skupina



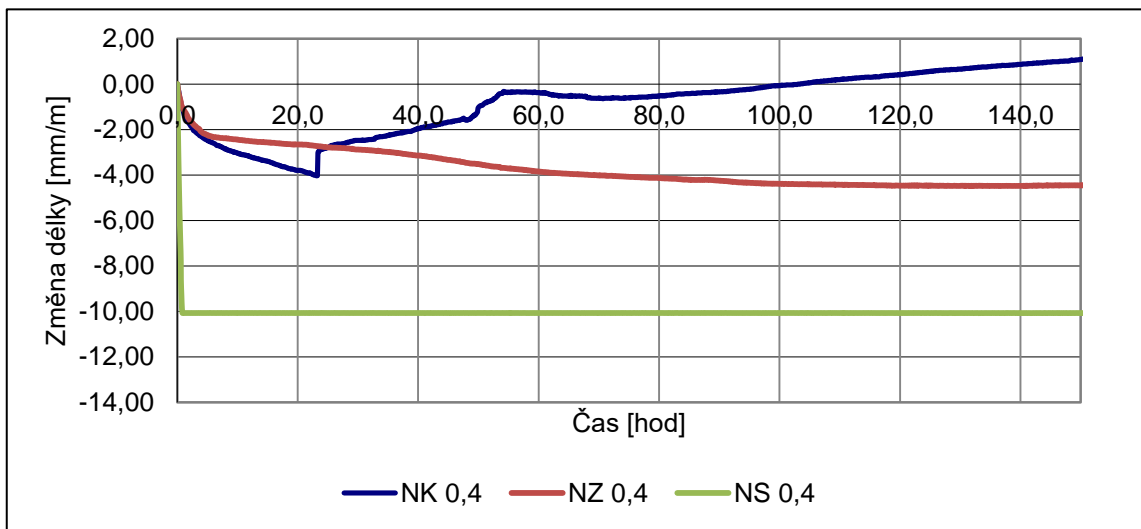
Graf č. 12: Deformace vlnovců, 2. skupina



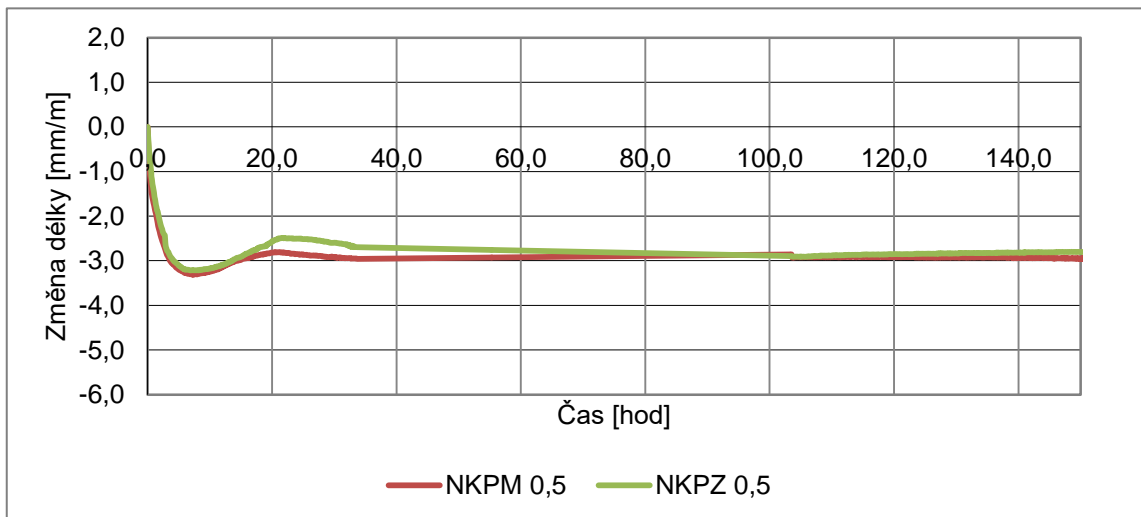
Graf č. 13: Deformace vlnovců, 3. skupina



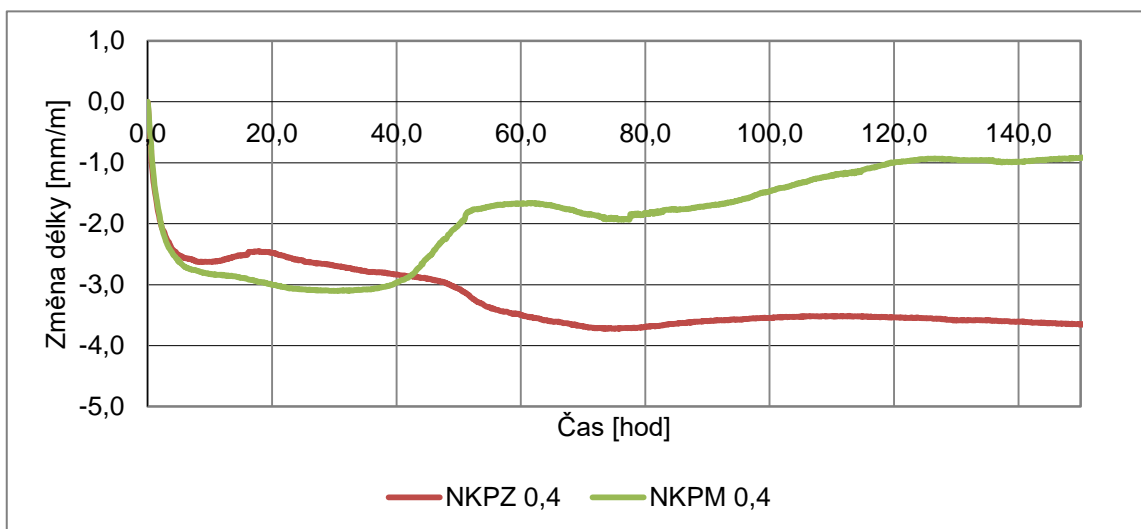
Graf č. 14: Deformace vlnovců, 4. skupina



Graf č. 15: Deformace vlnovců, 5. skupina



Graf č. 16: Deformace vlnovců, 6. skupina



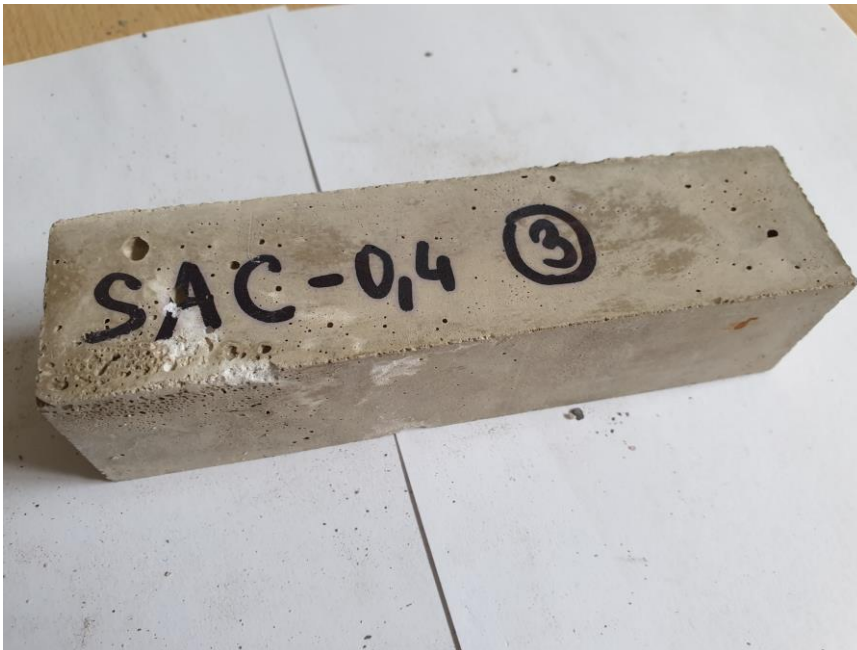
5.3. Vyhodnocení

5.3.1. Měření dilatace

U všech vzorků probíhalo dlouhodobě zkracování. Některé vzorky se zpočátku malinko protáhly, ale nijak výrazně. Je vidět, že okolní prostředí výrazně ovlivňuje deformaci i její samotný průběh. U obou vodních součinitelů je vidět, že vzorky ponechané na vzduchu mají i několikanásobné hodnoty deformace.

Hmotnost také u většiny vzorků klesala, také s občasnými počátečními nárůsty. Výjimkou je však kompozit s SAC, u kterého hmotnost ve většině případů rostla, až na vzorek s vodním součinitelem 0,4, který byl ponechán na běžném vzduchu. Ten však i tak měl minimální úbytek hmotnosti. Další zajímavý průběh měl vzorek s křemičitým úletem s vodním součinitelem 0,5, ponechán na vzduchu, který měl téměř nulové změny v hmotnosti.

Dále jsem během měření pozoroval vnější vzhled (vznik prasklinek, barva). Vzorky vykazovaly minimální povrchové poškození, s výjimkou vícesložkových směsí (NKPZ, NKPM). Tato tělesa měla po celém povrchu velké množství prasklinek. U jednoho vzorku SAC pak vznikly na povrchu výrazné mapy. Ostatní vzorky pak byly jednobarevné, nebo s občasnou změnou odstínu (vlhkost, mastnota).



Obrázek č. 9: Povrch SAC



Obrázek č. 10: Povrch NK

5.3.2. Vlnovci

Z grafů je patrné, že se většinou vzorek v prvních hodinách zkrátil. Následné průběhy jsou pak velmi odlišné, jak podle směsí, tak i vodních součinitelů. U směsí NS a NM došlo z technických důvodů k chybě měření. To je důvod, proč graf pokračuje rovnoběžně s vodorovnou osou.

U páté skupiny vzorků vypadl během měření elektrický proud, a tím se přerušilo měření asi na čtyři dny. Vynechanou oblast jsem pak doplnil lineární spojnici.

U těchto výše zmíněných vzorků bude potřeba zkoušku opakovat.

6. Mechanické vlastnosti

Na zkušebních vzorcích, které jsem použil pro měření dilatace, jsem pak zjišťoval mechanické vlastnosti po 28 dnech, a to:

- pevnost v tahu ohybem
- pevnost v tlaku

Ještě před tím jsem si však změřil výšku každého tělesa na třech místech (na koncích a uprostřed). Tyto výšky jsem pak zprůměroval a použil pro výpočty pevností. Také jsem v rámci tohoto měření spočítal i objemovou hmotnost jednotlivých vzorků, kterou uvádím v tabulce č. 9, 10, 11, 12 podle vzorce:

$$\rho = \frac{m}{d_1 \cdot d_2 \cdot l}$$

kde: ρ je objemová hmotnost [kg/m^3]

m je hmotnost tělesa při posledním vážení [kg]

l je délka tělesa [m]

d_1 a d_2 jsou rozměry příčného řezu [m]

6.1. Pevnost v tahu ohybem

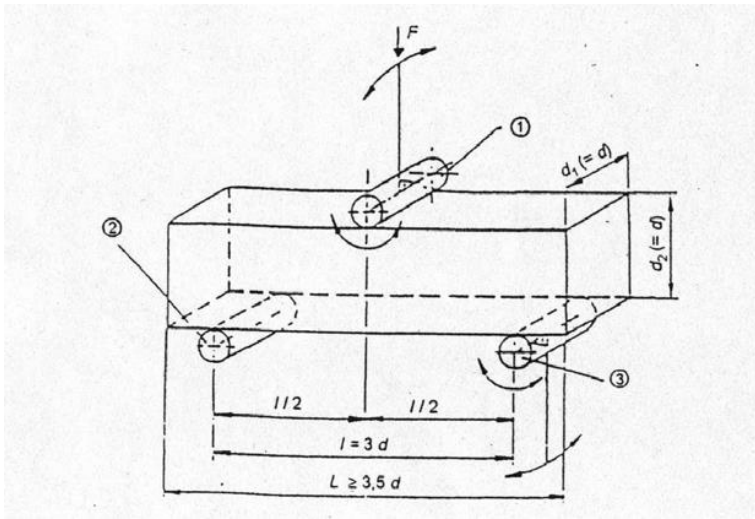
Tuto zkoušku jsem prováděl podle normy: *ČSN EN 12390-5, Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Zatěžoval jsem jedním břemenem uprostřed.

Podstata zkoušky

Vzorek je vystaven ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím horního zatěžovacího a spodních podpěrných válečků.

Zkušební zařízení

Zkušební lis



- 1) zatěžovací válečky (otočné a výkyvné),
- 2) podpěrný váleček,
- 3) podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

Obrázek č. 11: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa (z ČSN EN 12390-5)

Zkušební postup - zatěžování

Všechny zatěžovací a podpěrné válečky musí ležet rovnoměrně na zkušebním tělese, které je zatěžováno kolmo na směr hutnění. Nastaví se konstantní rychlost zatěžování od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s. Zatěžuje se plynule bez nárazu, a zatížení se zvyšuje stanovenou konstantní rychlostí do porušení.

Výsledky

Pevnost v tahu ohybem je dána následujícím vztahem:

$$f_{cf} = \frac{3.F.l}{2.d_1.d_2^2}$$

kde: f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa]

F maximální zatížení [N]

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 jsou rozměry příčného řezu [mm]

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa. [15]

6.2.Pevnost v tlaku

Při provádění této zkoušky jsem vycházel z normy: ČSN EN 12390-3, Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Podstata zkoušky

Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu.

Zkušební zařízení

Zkušební lis

Zkušební postup

Příprava a usazení zkušebních těles

Otřou se dotykové plochy tlačných desek lisu a odstraní se všechny zbytky písku nebo jiného uvolněného materiálu z povrchu zkoušeného tělesa na plochách, které budou v dotyku s tlačnými deskami. Vzorek se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu, a umístí se na střed spodní tlačené desky.

Zatěžování

Nastaví se konstantní rychlost zatěžování od 0,2 MPa/s (N/mm²/s). Zatěžuje se plynule, bez nárazu. Zaznamená se dosažené maximální zatížení.

Výsledky

Pevnost v tlaku je dána následujícím vztahem:

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

kde: f_c je pevnost v tlaku [MPa]

F je maximální zatížení při porušení [N]

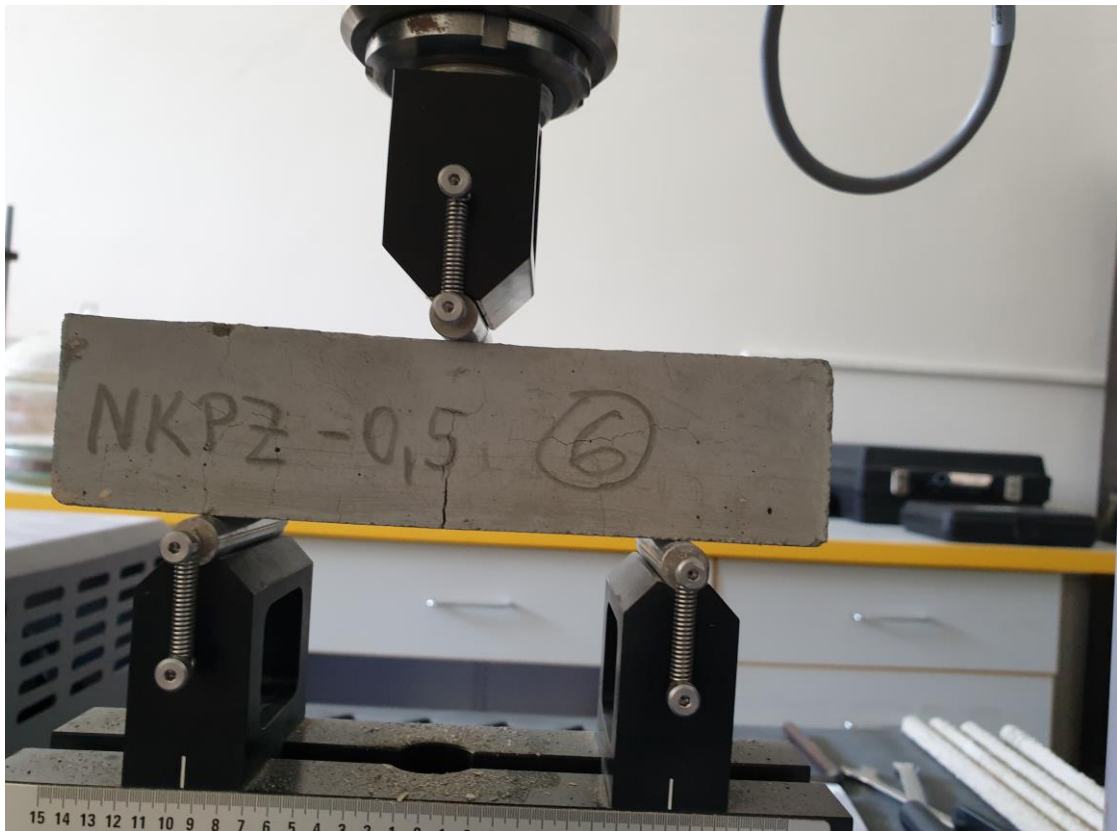
A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm²]

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,5 MPa. [16]

6.3. Průběh měření

Nejdříve jsem na všech tělesech zjistil pevnost v tahu ohybem. Hodnoty jsem dal do tabulky č. 10, a z každé sady jsem pak udělal aritmetický průměr a spočítal směrodatnou odchylku. Pokud se nějaká hodnota příliš lišila od ostatních dvou, tak jsem ji vyloučil.

Pevnost v tlaku jsem pak zjišťoval vždy na šesti tělíscích, která vznikla rozlomením při předchozí zkoušce. Tato tělíska jsem pak dal do speciálního přípravku do lisu. Získané hodnoty jsem dal do tabulky č. 11, a stejně jako u ohybu jsem pak spočítal aritmetický průměr a směrodatnou odchylku. Případně jsem obdobně vylučoval některé hodnoty.



Obrázek č. 12: Zkouška pevnosti v tahu ohybem



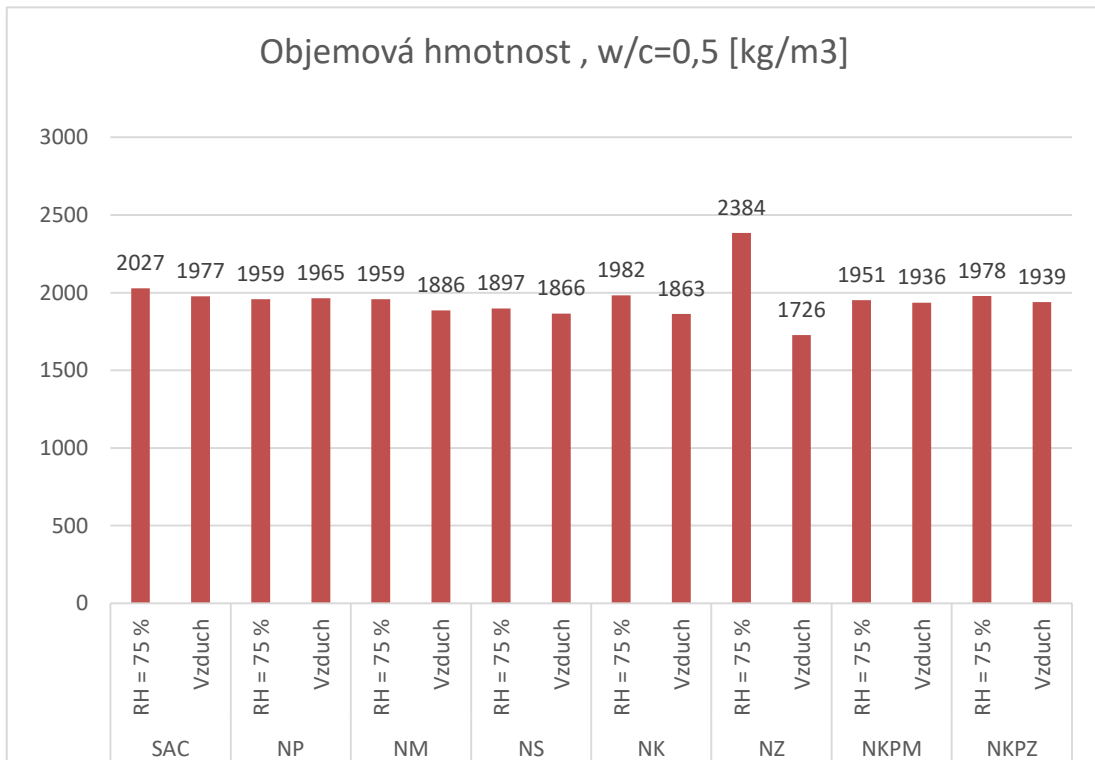
Obrázek č. 12: Zkouška pevnosti v tlaku

6.4. Vyhodnocení

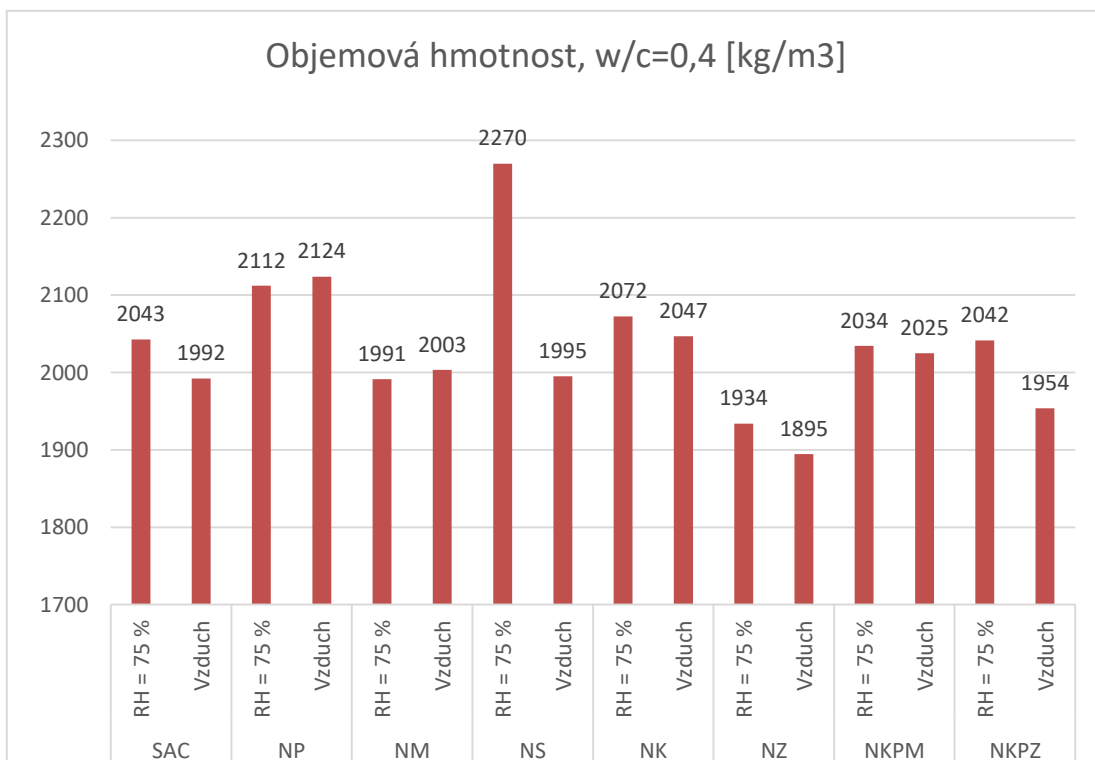
Bylo zde málo hodnot, které jsem musel vyloučit, ty, u kterých jsem to udělal, jsem v tabulkách přeškrtnul. Většinou se hodnoty stejných směsí příliš nelišily, až na SAC směs, kde je rozptyl pevností docela velký.

Z jednotlivých tabulek jsem vytvořil pro přehlednost grafy. Zde je vidět, že objemové hmotnosti se příliš neliší. Naopak v pevnostech jsou už rozdíly znatelné. Obzvláště pevnost v tahu ohybem má SAC směs dvojnásobnou oproti ostatním.

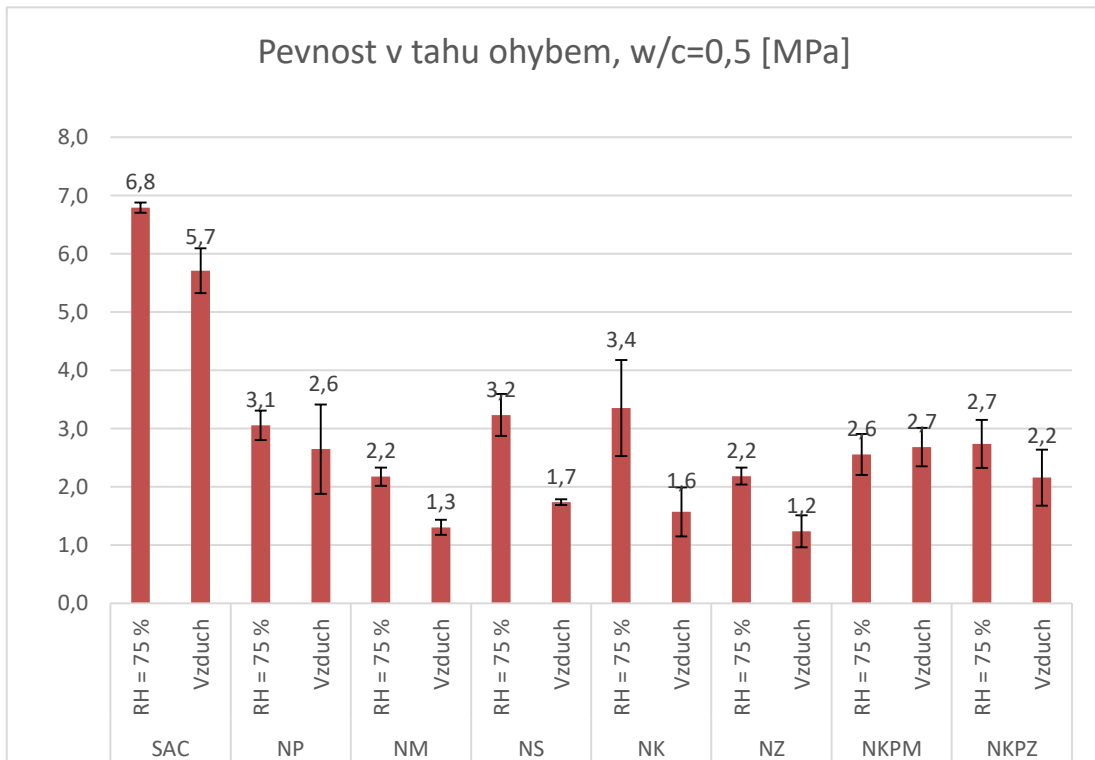
Graf č. 17: Objemové hmotnosti, $w/c = 0,5$



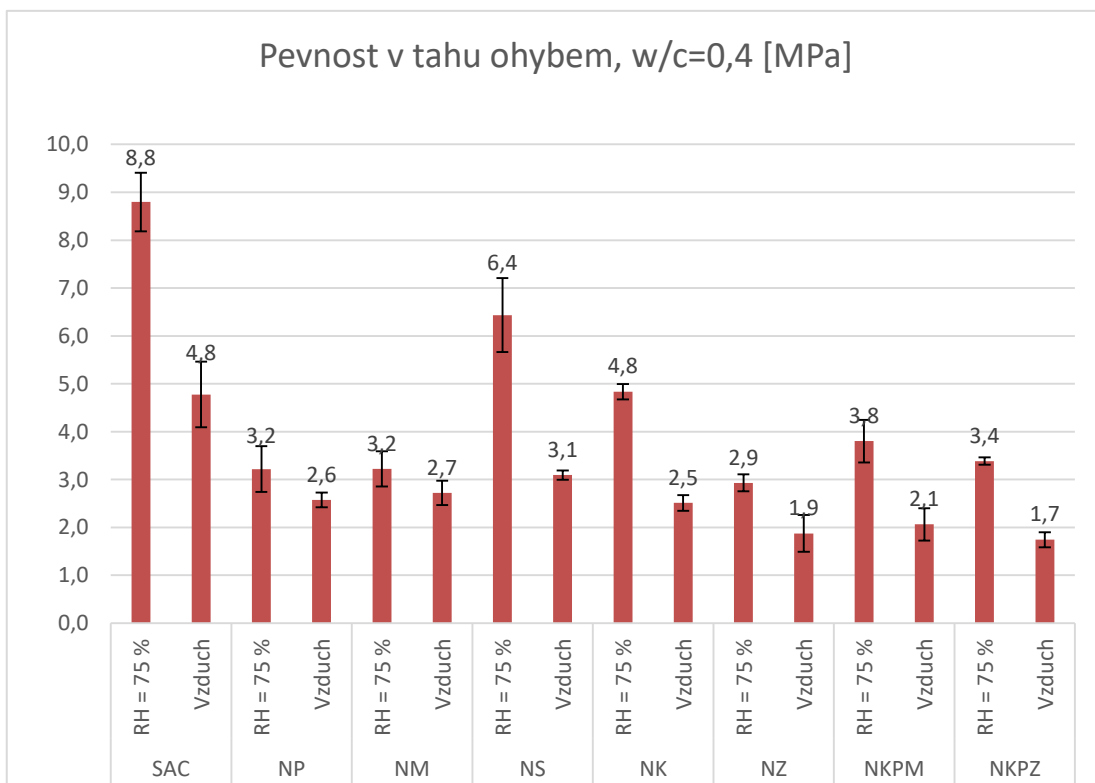
Graf č. 18: Objemové hmotnosti, $w/c = 0,4$



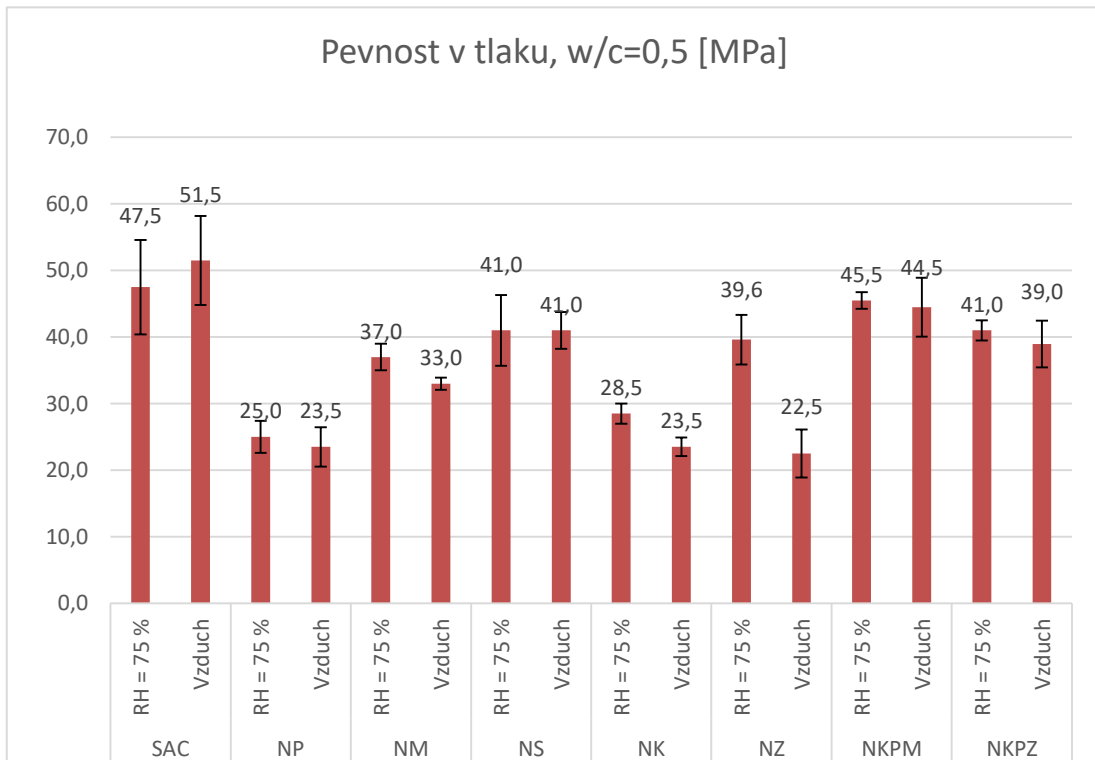
Graf č. 19: Pevnosti v tahu ohybem, $w/c = 0,5$



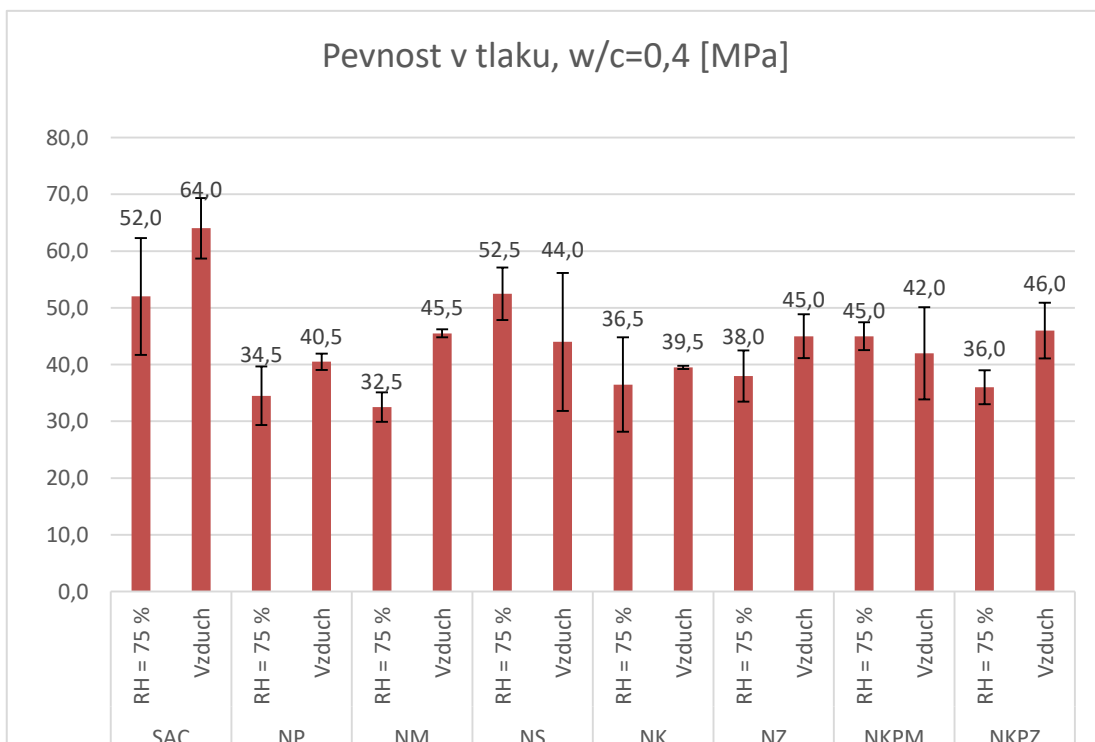
Graf č. 20: Pevnosti v tahu ohybem, $w/c = 0,4$



Graf č. 21: Pevnosti v tlaku, $w/c = 0,5$



Graf č. 22: Pevnosti v tlaku, $w/c = 0,4$



7. Závěr

Způsoby využití jaderných technologií neustále narůstají. Proto je důležité mít co nejdříve vyřešené, co se bude dál dít s odpadem, který při tom vzniká, ať už se jedná o pevný, kapalný nebo plyný odpad.

Během experimentů jsem zjistil vlastnosti osmi různých kombinací směsí, každou s dvěma různými vodními součiniteli, a z nich vytvořených kompozitů.

Technologickými vlastnostmi cementových past jsem zjistil, které směsi jsou vhodné a které nikoli. Směsi s příliš brzkým počátkem tuhnutí jsou nevhodné z důvodu velmi krátké doby, po kterou je možné danou směs uložit do nádob pro to určených. Směsi s dlouhou dobou tuhnutí pak zbytečně navyšují čas, který je potřeba věnovat daným kompozitům. Díky strážáčímu stolku vím, s kterou směsí se bude nejlépe pracovat. Dále jsem zjistil, že všechny směsi jsou velmi silně zásadité.

Reologické vlastnosti ukázaly, že dané směsi mají velmi odlišné hodnoty i průběhy deformací, a nezáleží jen na směsi, ale také velmi na množství záměsové vody. U všech vzorků však docházelo ke smršťování, i když v některých případech docházelo na počátku k zvětšování objemu. Při zkoumání objemových změn pomocí vlnovců došlo k několika technickým chybám, a proto by bylo dobré tuto zkoušku opakovat.

Mechanické vlastnosti byly taktéž velmi odlišné. Pevnosti se odchylovaly o násobky. Výrazně nejlepší hodnoty měla směs SAC. U té však jako jediné docházelo při zkouškách ke křehkému lomu a byly zde největší odchylky hodnot.

Díky tomuto experimentu vím, které směsi jsou jednoznačně nevhodné a které by se naopak měly dále zkoumat. CSA cement se v mnoha ohledech jevil jako vhodný kandidát. Otázkou však je, jaké bude mít vlastnosti z dlouhodobého hlediska.

Pro zjištění ideálního materiálu pro solidifikaci tekutého radioaktivního odpadu však bude potřeba udělat ještě mnoho výzkumů.

8. Seznam literatury

- [1] ČEZ, 0070 - *Bitumenace*. [online]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/bitumenace.html>
- [2] ČEZ, 0087 - *Cementace*. [online]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/cementace.html>
- [3] ČEZ, 0915 - *Vitrifikace*. [online]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/vitrifikace.html>
- [4] ENERGYWEB, *Radioaktivní odpady z jaderných elektráren*. [online]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.3.4
- [5] CALTRA Nederland bv, *BeliCem*, 2019, 4-6
- [6] Metakaolin - obecné informace : ČLUZ a.s.. *ČLUZ a.s.: žáruvzdorná ostřiva - lupek a kaolín* [online]. Copyright © ČLUZ a.s. 2006 [cit. 26.05.2019].
Dostupné z: <http://www.cluz.cz/cz/metakaoliny-obecne-informace>
- [7] Křemičité úlety | eBeton - Specialista na beton. *eBeton | eBeton - Specialista na beton* [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/kremicite-ulety>
- [8] Vysokopecní struska | eBeton - Specialista na beton. *eBeton | eBeton - Specialista na beton* [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vysokopecni-struska>
- [9] KOŤÁTKOVÁ. Jaroslava, *Studium vlastností speciálních betonů s příměsí přírodního zeolitu*, Praha, 2015, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
- [10] *pH* – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/PH>

- [11] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000
- [12] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017
- [13] *Ultrazvukový měřic počátku a konce tuhnutí | strojeprzkusebnictvi.cz. Stroje pro zkušebnictví | strojeprzkusebnictvi.cz [online]. Copyright © 2011, Polní 23 [cit. 26.05.2019]. Dostupné z: <https://www.strojeprzkusebnictvi.cz/ultrazvukovy-meric-pocatku-a-konce-tuhnuti.html>*
- [14] *TZB portál. | odborné články, informace firem, konferencie | správa budov, stavebníctvo, kúrenie-voda-plyn. TZB portál [online]. Dostupné z: <https://www.tzbportal.sk/beton-betonarky/vliv-smesnych-cementu-zejmena-vapencovych-na-reologicke-vlastnosti-cementovych-past>*
- [15] ČSN EN 12390-5. *Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [16] ČSN EN 12390-3, *Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009

9. Seznam obrázků

<i>Obrázek č. 1: Essentials pH metr</i>	12
<i>Obrázek č. 2: Střásací stolek</i>	13
<i>Obrázek č. 3: Elektronický Vicatův přístroj</i>	14
<i>Obrázek č. 4: Ultrazvukový Vicatův přístroj (Vikasonic)</i>	14
<i>Obrázek č. 5: Záznam elektronického Vicatova přístroje</i>	17
<i>Obrázek č. 6: Vytváření zkušebních těles</i>	19
<i>Obrázek č. 7: Měření dilatací</i>	20
<i>Obrázek č. 8: Vlnovci</i>	29
<i>Obrázek č. 9: Povrch SAC</i>	32
<i>Obrázek č. 10: Povrch NK</i>	33
<i>Obrázek č. 11: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa (z ČSN EN 12390-5)</i>	35
<i>Obrázek č. 12: Zkouška pevnosti v tahu ohybem</i>	37
<i>Obrázek č. 13: Zkouška pevnosti v tlaku</i>	38

10. Seznam tabulek

<i>Tabulka č. 1: Výsledky technologických zkoušek</i>	18
<i>Tabulka č. 2: Granulometrie a navážky</i>	19
<i>Tabulka č. 3: Dilatace $w/c = 0,5$ [mm/m]</i>	21
<i>Tabulka č. 4: Dilatace $w/c = 0,4$ [mm/m]</i>	22
<i>Tabulka č. 5: Změna hmotností $w/c = 0,5$ [g/kg]</i>	23
<i>Tabulka č. 6: Změna hmotností $w/c = 0,4$ [g/kg]</i>	24

11. Seznam grafů

<i>Graf č. 1: Srovnání průběhů přenosových časů v prvních deseti hodinách</i>	15
<i>Graf č. 2: Srovnání průběhů modulů pružnosti v prvních deseti hodinách</i>	16
<i>Graf č. 3: Dilatace, w/c = 0,5, RH = 75 %</i>	25
<i>Graf č. 4: Dilatace, w/c = 0,5, na vzduchu</i>	25
<i>Graf č. 5: Dilatace, w/c = 0,4, RH = 75 %</i>	26
<i>Graf č. 6: Dilatace, w/c = 0,4, na vzduchu</i>	26
<i>Graf č. 7: Změna hmotnosti, w/c = 0,5, RH = 75 %</i>	27
<i>Graf č. 8: Změna hmotnosti, w/c = 0,5, na vzduchu</i>	27
<i>Graf č. 9: Změna hmotnosti, w/c = 0,4, RH = 75 %</i>	28
<i>Graf č. 10: Změna hmotnosti, w/c = 0,4, na vzduchu</i>	28
<i>Graf č. 11 Deformace vlnovců, 1. skupina</i>	30
<i>Graf č. 12: Deformace vlnovců, 2. skupina</i>	30
<i>Graf č. 13: Deformace vlnovců, 3. skupina</i>	30
<i>Graf č. 14: Deformace vlnovců, 4. skupina</i>	31
<i>Graf č. 15: Deformace vlnovců, 5. skupina</i>	31
<i>Graf č. 16: Deformace vlnovců, 6. skupina</i>	31
<i>Graf č. 17: Objemové hmotnosti, w/c = 0,5</i>	39
<i>Graf č. 18: Objemové hmotnosti, w/c = 0,4</i>	39
<i>Graf č. 19: Pevnosti v tahu ohybem, w/c = 0,5</i>	40
<i>Graf č. 20: Pevnosti v tahu ohybem, w/c = 0,4</i>	40
<i>Graf č. 21: Pevnosti v tlaku, w/c = 0,5</i>	41
<i>Graf č. 22: Pevnosti v tlaku, w/c = 0,4</i>	41