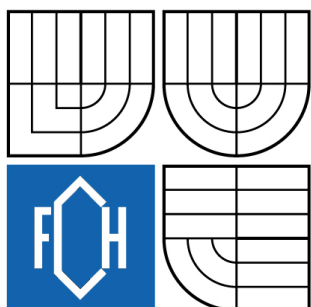


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE A CHEMICKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIE

OBJEMOVÉ ZMĚNY BETONŮ NA BÁZI REAKTIVNÍCH PRÁŠKOVÝCH KOMPONENT A MOŽNOSTI JEJICH REGULACE CHEMICKÝMI PŘÍSADY

VOLUME CHANGES OF CONCRETE BASED ON REACTIVE POWDER CONCRETE AND
POSSIBILITIES OF THEIR REGULATION WITH CHEMICAL ADMIXTURES

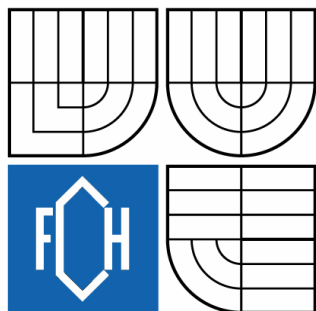
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACALARY THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

JAROSLAV HLAVÁČEK

Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.



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

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce: **FCH-BAK0406/2009** Akademický rok: **2009/2010**
Ústav: Ústav chemie materiálu
Student(ka): **Jaroslav Hlaváček**
Studijní program: Chemie a chemické technologie (B2801)
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálu (2808R016)
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.**
Konzultanti:

Název bakalářské práce:

Objemové změny betonů na bázi reaktivních práškových komponent a možnosti jejich regulace chemickými přísadami

Zadání bakalářské práce:

Literární rešerše
Výběr vhodných vzorků, poživ a modifikujících přísad
Příprava vzorků
Vyhodnocení vlivu na objemové změny

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2010

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě

Hlaváček Jaroslav
Student(ka)

Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 1.12.2009

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Velmi vysoké pevnosti RPC umožňují jejich neobvyklé až extrémní možnosti jejich aplikací. Objemové změny (smrštění) negativně ovlivňují jejich poměrně široké spektrum jejich využití, zejména při aplikacích kdy jsou využity k vyplňování trub či jiných konstrukčních prvků. V dnešní pokročilé době, kdy je na trhu mnoho chemických přísad a příměsí (např. expanzní složky) by mohl být tento nežádoucí efekt do značné míry eliminován, nebo zcela odstraněn. Pro RPC cementy však budou vhodné jen některé expanzní složky. Tato práce se zabývá studiem expanzních složek na bázi síranů a sledovány nejsou pouze objemové změny, ale také pevnostní charakteristiky a snášenlivost jednotlivých testovaných výztuží s testovanou matricí s obsahem expanzní složky.

ABSTRACT

Very high strength of RPC allows them to an unusual extreme possibilities of their applications. Volume change (shrinkage) negatively affects their relatively broad range of applications, particularly in applications which are used for filling tubes or other components. In today's advanced time with plenty of chemical ingredients and additives on the market (such as the expansion component) could be a side effect of this largely eliminated, or removed entirely. Only some components of the expansion will be appropriate for RPC cements. This reaserch investigates the expansion of ingredients on the basis of sulfates and monitors not only volume changes, but also the strength characteristics and tolerability of the tested anchors tested with a matrix component of the expansion.

KLÍČOVÁ SLOVA

RPC betony, vysokopevnostní betony, objemové změny, smrštění, ettringit, energosádrovec, anhydrit

KEYWORDS

RPC concretes, high-strength concretes, volume change, shrinkage, ettringit, gypsum, anhydrite

HLAVÁČEK, J. *Objemové změny betonů na bázi reaktivních práškových komponent a možnosti jejich regulace chemickými přísady.*

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

Poděkování:

Chtěl bych vyjádřit poděkování vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Opravilovi Ph.D. za odborné rady a pomoc při vypracování bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Teoretická část.....	7
2.1	RPC beton.....	7
2.2	Suroviny pro přípravu RPC betonu	8
2.2.1	Hlinitanový cement	8
2.2.2	Portlandský cement	9
2.2.3	Energosádrovec	12
2.2.4	Anhydrit	14
2.2.5	Ettringit.....	15
2.3	Plastifikátory a superplastifikátory	16
2.4	Objemové změny	17
3	Experimentální část	18
3.1	Příprava vzorků.....	18
3.2	Přístroje na měření pevností	19
3.2.1	Přístroj na měření pevnosti v ohybu (Michaelisův přístroj).....	19
3.2.2	Přístroj na měření pevnosti v tlaku.....	20
3.2.3	Měření na Graf-Kaufmanově přístroji:	21
4	Výsledky a diskuze.....	22
4.1	Použité suroviny	22
4.2	Testy na RPC kompozitech bez expanzní složky	23
4.3	Testy na RPC kompozitech s přídavkem 5% expanzní složky SC - I.....	26
4.4	Testy na RPC kompozitech s přídavkem 10% expanzní složky SC - I.....	29
4.5	Testy na RPC kompozitech s přídavkem 30% expanzní složky SC - I.....	32
4.6	Testy na RPC kompozitech s přídavkem 5% expanzní složky CSA - 20	35
4.7	Testy na RPC kompozitech s přídavkem 10% expanzní složky CSA - 20	38
4.8	Testy na RPC kompozitech s přídavkem 30% expanzní složky CSA -20	41
5	Závěr.....	44
6	Požitá literatura	45

1 Úvod

V 60. letech 20. století malá skupina nadšenců začala vyrábět vysokopevnostní beton. Proč chtěli vylepšit něco, co velice dobře fungovalo? V těch dobách byla většina projektantů spokojena s návrhy staveb, založených na pevnostech betonu 15-20 MPa, které byly známé ekonomické a bezpečné. Konstrukteři si nemohli představit beton jako konstrukční materiál místo oceli. Do té doby byl beton chápán jako materiál vhodný pro stavbu základů výškových budov a stavbu podlah, nebo jako protipožární ochranu oceli. Toto se odehrávalo v Chicagu, kde odvážní projektanti povolili vysokopevnostní beton při důležitých stavbách. Z dnešního pohledu se zdají být normy pro vysokopevnostní beton velice malé, ale musíme vzít v úvahu, že v té době byla pevnost v tlaku 15-30 MPa. Záměr zdvojnásobit pevnosti v tlaku ze dne na den byla obrovská výzva. Musíme brát, že cement ani přísady jaké používáme dnes, nebyly v té době dostupné. Například beton se mlel na daleko hrubší částice, byly použity úplně jiné plastifikátory (lišily se ve složení a čistotě). O takových plastifikátorech jaké máme dnes, si mohli projektanti nechat jenom zdát.

Aby mohli projektanti prokázat kvality vysokopevnostního betonu, museli najít způsob, jak oslovit majitele nemovitostí a sdělit jim výhody nového materiálu. Kdekoli se navrhovala vysokopodlažní budova, výrobci betonu požádali stavebníka budovy o povolení zahrnout jeden nebo dva sloupy, vyrobené z experimentálního betonu o pevnosti v tlaku větší o 15-20 MPa, než dosud použitý beton, které projektant navrhnul jako hlavní sloupy. Tenhle krok byl úspěšný a vysokopevnostní beton se začal používat ve všech nových a důležitých stavbách, aniž by se objevily jakékoliv problémy.

Během 10 let používání betonu, se nárůst pevnosti v tlaku z 15-20 MPa vyšplhal na 45-60 MPa. Nárůst pevnosti v tlaku přestal přibližně na hranici zmiňovaných 60 MPa, kvůli technologickým překážkám, které se nemohly překovat tehdy dostupnými materiály. V 70. letech nebyli schopni vyrobit beton s pevností v tlaku nad 60 MPa, protože jim v tom bránily tehdy dostupné plastifikátory, které nebyly schopny snížit ještě více vodní součinitel. Takže hlavním úkolem bylo snížit vodní součinitel k hranici 0,35-0,40. Zde také hrál velkou roli výběr vhodného cementu. Ten neměl mít jen vhodné mechanické vlastnosti ale i reologické.

Poprvé byly použity superplastifikátory spíše pro ztekucení směsí, než pro snížení vodního součinitele. Původně měli superplastifikátory pro usnadnění uložení betonu bez rizika segregace a ztráty pevnosti, způsobené dodatečným přídavkem vody. Během 80 let 20. století se postupným zvyšováním dávek zjistilo, že mohou být používány ve velkém rozpětí dávek. Ale musí se dodat, že nikdy nebyly použity takovým způsobem, aby byl vodní součinitel pod 0,30 (to bylo považováno za minimální hodnotu). Tvzení, že 0,30 je minimální hodnota bylo vyvráceno panem H.H.Bachem, kdy snížil vodní součinitel na 0,16 u speciálního mikrocementu, velmi vysokou dávkou superplastifikátoru a použitím velmi jemné příměsi (křemičitý úlet) a tím dosáhl pevnosti v tlaku 280 MPa (jenže pouze laboratorně a za určitých podmínek). Tohle šokovalo betonářskou obec natolik, že okamžitě všichni začali postupně snižovat vodní součinitel až na 0,17 a pevnosti 74 MPa. V dnešní době se snažíme získat co největší pevnosti v tlaku (až 200 MPa) a to dosahují právě RPC betony.

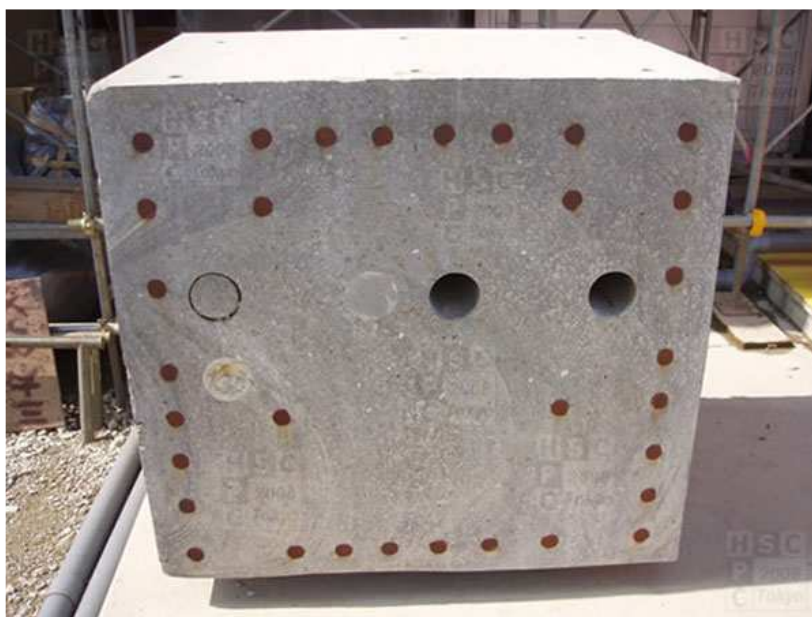
2 Teoretická část

2.1 RPC beton

Ultra vysocepevnostní beton, taktéž známý jako reaktivní práškový beton RPC (Reactive Powder Concrete) je vysoce pevnostní, tažný materiál sestavený kombinací portlandského cementu, křemičitých úletu, křemičitého prachu, křemičitého písku, přísadou vysoce redukující vodu, a ocelová nebo organická vlákna. Tento materiál poskytuje pevnosti v tlaku až do 200 MPa a pevnosti v tahu za ohybu až 50 MPa. Tyto impozantní mechanické vlastnosti jsou dosaženy díky užití následujících komponentů a technologií:

- 1) Je zvýšena míra homogenity materiálu tím, že se používá jednozrnná složka směsi o maximální velikosti 300 μm .
- 2) Při použití optimalizované granulometrie částic v systému se zvýší hustota uspořádání částic v systému.
- 3) Tuhnutí materiálu pod tlakem, vedoucí ke zmírnění vlivu chemického smrštění cementu.
- 4) Zlepšení mikrostruktury při vhodném užití tepelného ošetření.
- 5) Zlepšení houževnatosti materiálu při použití rozptýlené výztuže ocelovými mikrovlákny, jejichž rozměry jsou velice závažným faktorem, ovlivňujícím mechanické vlastnosti materiálu.

Materiály jsou obvykle dodávány jako tří-složkové směsi: prachové částice (portlandský cement, mikrosilika, křemičitý písek, křemenný prach) předem smíchané a uložené do vaku, superplastifikátor a vlákna, popřípadě mikrovlákna. Vynikající mechanické vlastnosti RPC betonů najdou uplatnění hlavně v předpjatých konstrukcích, které jsou v současné době ve stavebním průmyslu velice využívané. Umožňuje také odvážnější architektonické řešení betonových konstrukcí.¹



Obrázek 1

Řez sloupem s pevností 150 MPa

2.2 Suroviny pro přípravu RPC betonu

2.2.1 Hlinitanový cement

Hlinitanový cement má jako hlavní složky CaO, Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , ty mu podle určitého objemového složení dávají zabarvení.

Tabulka 1

Procentuální složení hlinitanového cementu

Třída	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Zbarvení
Nízkohlinitanový	36-40	37-42	3-8	11-17	Tmavošedý
Hlinitanový	39-42	49-52	5-8	1-1,5	Světlešedý
Vysocehlinitanový	17-20	68-80	0-0,5	0-0,5	Bílý

Výchozí suroviny jsou vápenec a bauxit. Suroviny jsou míchány v přibližném poměru 1:1. Hlinitanový cement má počáteční tuhnutí pomalé, ale poté následuje rychlé tvrdnutí. Po 12 až 24 hodinách dosáhne stejné pevnosti jako portlandský cement po 28 dnech (cca 50 MPa). Jeho konečná pevnost je vysoká, která se pohybuje v rozmezí 60-100 MPa, jenže po delší době nastává pevnostní pokles, tím pádem by se neměl používat na nosné konstrukce, protože by se rozpadly. Uvolněné teplo při procesu umožňuje práci i při $-10^{\circ}C$, ale zase tato vlastnost může vést k přehřátí masivních konstrukcí, proto by se na ně neměl moc používat. Je velice odolný vůči síranovým, uhličitanovým vodám a především mořské vodě - vděčí za to ochrannému gelu $Al(OH)_3$, ale alkalickým roztokům neodolá. Jeho odolnost ke zvýšeným nebo vysokým teplotám je lepší, když je obsah SiO_2 menší a Al_2O_3 větší. Hlinitanový cement je také vhodný na havarijní opravy betonových konstrukcí nebo na nádrže na minerální vody, ale především na výrobu žárobetonů-mají čím dál tím větší význam, protože se pece mohou opravovat, aniž by se přerušil jejich provoz.

2.2.1.1 Příprava hlinitanového cementu

Dva způsoby výroby:

1) Tavení v plamenné nebo elektrické obloukové peci rozdrčených surovin ($1600^{\circ}C$) – produkt by se měl na rozdíl od portlandského cementu pomalu ochlazovat, tak aby vzniklo správné mineralogické složení. Redukčním tavením se dá snížit obsah oxidů Fe, které se poté separují jako kovové Fe.

2) Slinování briket nebo granulí z pomletých surovin v rotační peci ($1250^{\circ}C$) – poslední dobou získává tento způsob přípravy hlinitanového cementu stále větší význam.^{2 3}

2.2.2 Portlandský cement

Název portlandský cement pochází od anglického města Portlandu, v jehož okolí se těžil kámen, připomínající svým vzhledem výrobky z cementu. Portlandský cement byl poprvé vyroben ve Velké Británii na počátku 19. Století. Patent na tento cement získal brit Joseph Aspdin v roce 1824. Je to nejpoužívanější druh cementu na výrobu betonu a malty.⁴

Tabulka 2

Hlavní minerály portlandského slínku

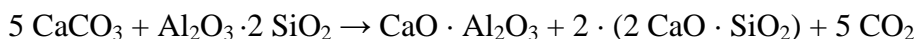
Název	Vzorec	slovní označení	obsah [% hm.]
Trikalcium silikát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)	alit	35-75
B-dikalcium silikát	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)	belit	5-40
Tetrakalcium feroaluminát	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_4FA)	celit	9-14
Trikalcium aluminát	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	amorfní fáze	3-15

Vlastnosti portlandského cementu se mění ve velice širokých mezích a to díky způsobu výroby i složení. Toho lze využít k získání osifikovaných cementů, jejichž vlastnosti se dají přesně upravit podle toho, k čemu by se měli použít. Prakticky se dají rozdělit do 4 základních typů:

- 1) Vysocehodnotné a rychlovažné cementy. Mají rychlé tvrdnutí a vysokou konečnou pevnost, to umožňuje zrychlení stavebních prací a menší spotřebu cementu. Jde o čisté portlandské cementy, kterým byla věnována zvláštní pozornost při sestavování směs a při celém procesu.
- 2) Silniční a rozpínavé cementy. Jejich předností je objemová stálost, popřípadě expanze při tuhnutí.
- 3) Pro masivní stavby, zde je důležitý snížený vývin tepla.
- 4) Cementy, které mají zvýšenou chemickou odolnost.

Rovnice vzniku portlandského slínku:

Nejprve rozklad pevných látek



Okolo 800°C nastává kalcinace, tj. rozklad kalcitu (CaCO_3) na volné vápno (CaO) a CO_2 . Zhruba od 900 až 950°C vznikají hlinitany vápenaté, např. C_5A_3 ($5 \text{ CaO} \cdot 3 \text{ Al}_2\text{O}_3$) a zejména C_3A ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)



Nad teplotou 1250°C se začíná objevovat kapalná fáze slínku a od této teploty se začíná tvořit C_3S ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$):



2.2.2.1 Tvrdnutí a tuhnutí portlandského cementu

Po smísení cementu a vody, začne cement tuhnout a postupně nabývat pevnosti. To znamená, že tvrdnutí i tuhnutí probíhá za aktivní účasti vody a vytvořené produkty jsou ve vodě nerozpustné a stálé. Tohle je charakteristické pro tzv. hydraulické tuhnutí a tvrdnutí. Praktické využití cementu jako pojiva umožňují jeho dva charakteristické rysy:

- 1) Po smísení s vodou nastane indukční perioda, na jejím začátku se vyvine velké množství tepla, ale stupeň hydratace zůstane nízký a tato směs je několik hodin tvárná.
- 2) Po zatuhnutí vyplňují hydratační produkty prostor, který byl zaplněn nejprve vodou, tímto vzniká hutný produkt aniž by došlo k velkým objemovým změnám.²

2.2.2.2 Jiné směry použití portlandského cementu

Portlandský cement je sice používán nejvíce pro výrobu betonu, ale v poslední době se objevily i jiné směry využití:

- 1) Cementy s regulovanou dobou tuhnutí. Průběh tuhnutí a tvrdnutí cementu lze regulovat hlavně přidávkou látek, jež zasahují do hydratačních mechanismů.
- 2) Vláknové výztuže. V komerčně prodávaných výztužích se hlavně přidávaly azbestové vlákna. Ohybová pevnost byla 2x-4x větší než u samotného pojiva. Dnes se více přidávají skleněná vlákna.
- 3) Přidávky polymerních látek. Velkou skupinu tvoří modifikované latexy, což je velice jemná vodivá disperze organického polymeru. Přidáním do cementové malty se pevnost cihlových stěn zvyšuje 2x-4x.²

2.2.2.3 Typy portlandského cementu

V zemích EU jsou cementy klasifikovány podle Evropské normy EN-197, podle které se dělí do pěti tříd. Tabulka 2 je uvedena na další straně.

Tabulka 3

Parametry jednotlivých druhů portlandského cementu podle EN 197 – 1							
druh cementu	název cementu	označení cementu	pevnostní třídy	slínek K (%)	složka cementu		doplňující složky (%)
					%	druh	
I	Portlandský cement	I	42,5; 52,5 42,5 R; 52,5 R	95 - 100	-	-	0 - 5
II	Portlandský struskový cement	II/A-S	32,5; 32,5	80 - 94	6 - 20	vysokopecní struska (S)	0 - 5
		II/B-S	R	65 - 79	21 - 35		0 - 5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	II/A-D	42,5	90 - 94	6 - 10	křemičitý úlet (D)	0 - 5
	Portlandský pucolánový cement	II/A-P	32,5	80 - 94	6 - 20	pucolán přírodní (P)	0 - 5
		II/B-P		65 - 79	21 - 35		0 - 5
		II/A-Q		80 - 94	6 - 20	pucolán průmyslový (Q)	0 - 5
		II/B-Q		65 - 79	21 - 35		0 - 5
	Portlandský popílkový cement	II/A-V	32,5; 42,5	80 - 94	6 - 20	popílek křemičitý (V)	0 - 5
		II/B-V		65 - 79	21 - 35		0 - 5
		II/A-W		80 - 94	6 - 20	popílek vápenatý (W)	0 - 5
II/B-W		65 - 79		21 - 35	0 - 5		
portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	II/A-T	42,5	80 - 94	6 - 20	kalcinovaná břidlice (T)	0 - 5	
II/B-T	65 - 79		21 - 35	0 - 5			
Portlandský cement s vápencem	II/A-L	32,5	80 - 94	6 - 20	vápencem (L)	0 - 5	
II/B-L	65 - 79		21 - 35	0 - 5			
Portlandský směsný cement	II/A-M	32,5	80 - 94	6 - 20	směs předcházejících složek (M)		
II/B-M	65 - 79		21 - 35				
III	Vysokopecní cement	III/A	32,5	35 - 64	35 - 65	vysokopecní struska (S)	0 - 5
		III/B		20 - 34	66 - 80		0 - 5
		III/C		5 - 19	81 - 95		0 - 5
IV	Pucolánový cement	IV/A	32,5	65 - 89	11 - 35	pucolán (P, Q), křemičitý úlet (D), křemičitý popílek (V)	0 - 5
		IV/B		45 - 64	36 - 55		0 - 5
V	Směsný cement	V/A	22,5	40 - 64	18 - 30	vysokopecní struska (S) pucolán (P, Q) Si popílek (V)	0 - 5
		V/B		20 - 39	18 - 30 30 - 50 30 - 50		0 - 5

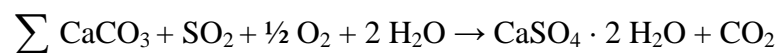
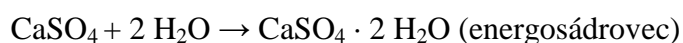
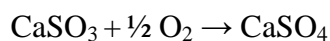
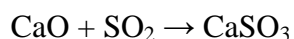
2.2.3 Energosádrovec

Veliký rozsah spalování fosilních paliv k energetickým účelům hlavně ve 2. polovině 20. století, má za následek emise značného množství oxidu siřičitého vznikajícího ze síry obsažené v palivech, a to zejména černého, hnědého uhlí, topných olejů a ropy. Snahy o snížení následků dopadu tohoto spalování vedly již dříve v řadě vyspělých zemí mimo jiné i k vývoji metod odsiřování spalin. K prvnímu úspěšnému kroku došlo již ve třicátých letech tohoto století. Jako první se uvádí propírání spalin londýnské elektrárny Battersea výkonu 120 MW alkalickou vodou z Temže obohacenou přísadkou vápenného kalu. Účinnost dřevěného absorbéru dosahovala až 95%. Klasická vápenná vypírka spalin, byla poprvé vyzkoušena v britské elektrárně Fulham v roce 1935.

Za druhé světové války se vývoj přerušil a následnou dobou poválečných rekonstrukcí se původně prosazovala metoda rozptylování emisí výstavbou vysokých komínů. To vedlo k rychlému růstu problémů s emisemi SO₂ a kyselými dešti k celosvětové ekologické hrozbě. V 70. letech vzhledem ke stále se zvyšujícím objemům spalování paliv, což mělo za následek rostoucí kvanta emisí oxidu uhličitého a velmi akutní ekologické ohrožení v některých oblastech koncentrace průmyslu, začalo v řadě průmyslově vyspělých zemí hromadné uplatňování systémů odsiřování spalin velkých topenišť. Pro odsiřování kouřových plynů se ve většině případů používá vodní suspenze vápence nebo páleného vápna. Produktem tohoto procesu je síran vápenatý nazvaný energosádrovec.²

2.2.3.1 Vznik energosádrovce

Chemické reakce popisující vznik energosádrovce:



Na 1 mol SO₂ potřeba 1 mol CaCO₃ vznikne 1 mol energosádrovce a 1 mol CO₂.

2.2.3.2 Energosádrovec v praxi

Energosádrovec jako surovina je využíván hlavně při výrobě sádry a cementu. Další uplatnění je při výrobě omítkových směsí. Méně čisté, případně průmyslově nevyužité energosádrovce bývají často ukládány.

Hlavní uplatnění energosádrovce v cementářském průmyslu je jako regulátor tuhnutí, v některých případech pak jako přídavek do surovinové směsi na vázání většího množství alkálií - to slouží k úpravě síranového modulu.⁵

2.2.3.3 Příklad složení energosádrovce

Tabulka 4

Ukázka složení energosádrovce

Energosádrovec Počerady	
Složka	Obsah [% hmotn.]
CaSO ₄ · 2H ₂ O	97,70
CaCO ₃ + MgCO ₃	0,9
SiO ₂ + NZ	1,10
Al ₂ O ₃	0,16
Fe ₂ O ₃	0,13
TiO ₂	0
Na ₂ O + K ₂ O	0,01
Cl ⁻	5,3 ppm

2.2.4 Anhydrit

Anhydrit je přírodní forma bezvodého síranu vápenatého (CaSO_4), která je spolu se sádrovcem nebo také halitem (solí kamennou), součástí evaporitových ložisek. Má tedy stejný způsob vzniku jako sádrovec a jejich vznik je závislý pouze na teplotě roztoku. V evaporitových sedimentech ale může vzniknout dehydratací (to je ztráta vody) ze sádrovce. A naopak sádrovec může vzniknout hydratací anhydritu. Průmyslové sádrovce jsou takové, kde se jedná o druhotné suroviny vznikající buď při odsiřování spalin tepelných elektráren a tepláren (tzv. energosádrovce), nebo jako vedlejší produkt v chemickém, potravinářském (tzv. chemosádrovce). Energo i chemosádrovce dokáže v dnešní době plně nahradit přírodní sádrovec. Používají se pro výrobu sádry, sádrokartonových desek a dalších výrobků na bázi sádry. Nebo se také používá jako regulátor tuhnutí při výrobě cementu. Jeho obsah sádrovce je většinou vysoký (často nad 90 %), od přírodní suroviny se však odlišují malou velikostí zrna a vyšší vlhkostí.⁶

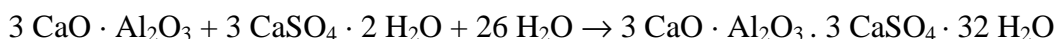


Obrázek 2
Přírodní forma anhydritu

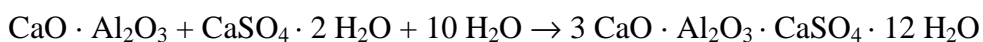
2.2.5 Ettringit

Vznik ettringitu je závislý nejen na přítomnosti vhodných chemických komponent, ale také na tlaku při zpracování, kdy se stoupajícím tlakem obsah ettringitu výrazně klesá. Jeho výhodou je flexibilní struktura, která umožňuje snadné zabudování toxických prvků do stabilní struktury, která je ve vodě téměř nerozpustná.

Rovnice vzniku ettringitu :



Monosulfát vzniká podle schématu:

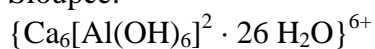


Obrázek 3
Zvětšenina ettringitu

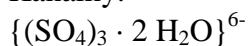
2.2.5.1 Struktura ettringitu

Ettringit tvoří hexagonální prizmatické nebo jehlicovité krystaly, které mají dvě zřetelně odlišné strukturální složky, sloupce a kanálky.

Sloupce:



Kanálky:



2.2.5.2 Příprava ettringitu

Ettringit se dá připravit několika způsoby, hodnota pH musí být udržována v rozmezí 10,7 až 12,5, neboť pouze v tomto rozsahu je ettringit stabilní.⁷

Tabulka 5

Způsoby přípravy ettringitu

	Reaktanty	pH
1	3 CaCO ₃ , Al ₂ (SO ₄) ₃ , 3 CaO	11,5
2	6 Ca(OH) ₂ , Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18 H ₂ O	11,0-12,0
3	3 Ca(OH) ₂ , 3 CaSO ₄ · 2H ₂ O, Al(OH) ₃	11,0
4	Al ₂ (SO ₄) ₃ , 6 CaCl ₂ , 12 NaOH	11,5

2.3 Plastifikátory a superplastifikátory

Plastifikační neboli vodoredukující přísady: redukují potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.

Superplastifikační neboli silně vodoredukující přísady: jsou látky, které výrazně redukují potřebné množství vody při stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.

Plastifikační přísadou musí být sníženo množství vody o více jak 5 % při stejné konzistenci stanovené sednutím nebo rozlitím a u superplastifikátoru o více jak 12 %. Pevnost v tlaku přidáním plastifikační přísady by mělo narůst za 7 a 28 dní nejméně na 110 % proti referenčnímu betonu. Při použití superplastifikátoru by měla v důsledku redukce množství vody vzrůst pevnost v tlaku za 1 den nejméně na 140 % a za 28 dní nejméně na 115 % proti referenčnímu betonu.

Existují 4 základní typy komerčních superplastifikátorů:

- 1) Sulfonované soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydů, většinou se označují jako sulfonáty polynaftalenů, nebo úplně jednoduše jako naftalenové superplastifikátory.
- 2) Sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu, obvykle jsou označovány jako sulfonáty polymelaminu, nebo opět jednoduše melaminové superplastifikátory.
- 3) Lignosulfonáty s velmi nízkým obsahem sacharidů a povrchově aktivních činidel.
- 4) Polykarboxyláty a polyakryláty - v dnešní době bezesporu nejvýznamnější.²

2.4 Objemové změny

Objemové změny je jedna z hlavních vlastností, která by neměla být opomíjena u jakéhokoli projektu. Jedná se především o:

1) Hydratační respektivě chemické smrštění. To souvisí s úvodní chemickou reakcí, při které reaguje záměsová voda se slinkovými minerály za vzniku většinou amorfních kalciumsilikáthydrátových fází. Důsledkem těchto reakcí je kontrakce, která souvisí se vznikem zajímavého pórového systému.

2) Smrštění, které je spojeno se změnou vlhkosti betonu. Pokud je beton trvale exponován pod vodou, má tendenci k nabývání (kladným objemovým změnám). Naopak při postupném vysychání se cementová matrice smršťuje,

3) Klasická teplotní dilatace související se změnami teploty. Koeficient teplotní roztažnosti betonu je standardně uváděn hodnotou $10 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$, ale ve skutečnosti se v závislosti na typu hrubých frakcí kameniva pohybuje v docela širokém rozmezí a to od $6 \cdot 10^{-6}$ do $13 \cdot 10^{-6}$.

4) Dotvarování. Na objemové změny působí silové účinky vyvolané pružně plastickou deformací.

V praktickém hledisku jsou nejvýznamnější objemové změny související s vysycháním. Tyto objemové změny souvisejí s rychlostí odparu záměsově vody z betonu a jsou tedy v počátečních fázích významně závislé na způsobu jeho ošetřování. Normálním důsledkem těchto objemových změn je tvorba tzv. smršťovacích trhlin, které vznikají během prvních desítek hodin po betonáži. Ze začátku jsou trhliny velice malé, ale stále se rozšiřují, po určitém čase se dají pozorovat pouhým okem. Objemové změny nejsou jeho vadou, ale zcela přirozenou součástí procesu zrání. Objemové změny betonu se dají eliminovat, avšak musí být použity speciální přísady, které jsou při běžné průmyslové produkci betonu jen obtížně použitelné.

Reálně se proto objemovým změnám čelí hustým vyztužením. To zachytí síly resp. napětí, které vzniká v důsledku objemových změn a zajistí, že místo širších okem viditelných trhlin vznikne větší množství malých trhlin s šířkou pod 0,1 mm, které jsou jak z funkčního, tak i estetického hlediska docela bezvýznamné.

Druhou praktickou možností je pak provedení řezaných či jinak vytvořených spár v betonovém prvku. Tyto spáry zajistí, že objemové změny (trhliny) vzniknou v předem geometricky definovaných místech.

Samotné počáteční ošetřování betonu může objemové změny (jeho smrštění) pouze oddálit, nikoli však eliminovat. Objemové změny, které proběhnou, jsou nevratné a vzniklé trhliny nemají tendenci se uzavírat.⁸

3 Experimentální část

V této části jsou popsány způsoby přípravy vzorků a metody jejich testování.

3.1 Příprava vzorků

Zkušebními vzorky pro zkoušky pevností v tahu za ohybu a v tlaku byly trámečky o rozměrech 20x20x100 mm. Pro měření délky vzorků byly použity trámečky o rozměrech 40x40x160 mm. Směsi byly homogenizovány v míchačce. Směsi A, C, E byly míchány v tomto pořadí-voda, Secutec, suk, (expanzní složka), bauxit, výztuž a dolívala se voda. Směsi B a D byly míchány takto-nejdříve se rozptýlila vlákna do vody a poté se přidal Secutec, suk, (expanzní složka), bauxit, výztuž a dolívala se voda. Bylo namícháno 7 druhů vzorků. Nejprve samostatný beton, poté 3 druhy s obsahem expanzní složky SC - I (5%, 10%, 30%) a 3 druhy s obsahem expanzní složky CSA - 20 (5%, 10%, 30%). Následně se vzorky plnily do připravených trámečků na vibračním stole a uloženy. Následný den byly vždy vzorky vyjmuty a ponechány normálnímu zrání při laboratorních podmínkách.

Formy pro zhotovení zkušebních trámčů musí být vyrobeny z oceli minimální tvrdosti podle Brinella HB = 140 tak, aby v nich mohla být vyrobena současně tři zkušební tělesa. Ke kovové podložce musí být formy pevně přichyceny. Při plnění se musí zabránit unikání vody mezi formou a podložkou.



Obrázek 4
Vibrační stůl



Obrázek 5
Trámečky pro přípravu vzorků (vlevo 40x40x160mm, vpravo 20x20x100mm)

3.2 Přístroje na měření pevnosti

3.2.1 Přístroj na měření pevnosti v ohybu (Michaelisův přístroj)

Zařízení pro zkoušení pevnosti v ohybu musí být schopno vynaložit a změřit sílu nejméně 6,3 kN s přesností 1 % v horních 4/5 rozsahu. Vlastní lámací mechanismus sestává se ze dvou válcových opěr o průměru 10 mm, vzdálených od sebe $(100,0 \pm 0,5)$ mm. Třetí, tlačný válec, má průměr rovněž 10 mm a je umístěn přesně uprostřed uvedených dvou opěr. Tři vertikální roviny proložené osami válců, musí být rovnoběžné během celé zkoušky. Každé dva roky musí být zařízení úředně ověřeno.



Obrázek 6

Michaelisův přístroj s brokovou zátěží pro měření pevnosti v ohybu

Zkušební trámečky se umístí postupně bočními plochami symetricky na opěrné válce a provede se postupné zatěžování. Nárůst tlaku na válec, musí být $50 \pm 5 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$, až do okamžiku lomu. Na Michaelisově přístroji s brokovou zátěží se celkové zatížení zjistí zvážením zátěže.⁹



Obrázek 7

Ukázka lámání vzorku na Michaelisově přístroji

Při výpočtu pevnosti v ohybu se váha nádoby vynásobí koeficientem 1,15 pro velké tělesa, nebo 7,35 pro malé tělesa (což byly mé vzorky).

$$\sigma_{Po} = 7,35 \cdot m$$

kde σ_{Po} pevnost v ohybu v MPa
m hmotnost nádoby s broky

3.2.2 Přístroj na měření pevnosti v tlaku

Zařízení pro zkoušení pevnosti v tlaku (trámečků 20x20x100 mm) musí být sestaveno ze dvou broušených ploch z oceli o nejmenší tvrdosti, uspořádaných tak, že během zkoušky jsou osově přesně nad sebou. Úchylka rovinnosti obou plošek nesmí být větší než $\pm 0,01$ mm. Pro zkušební trámečky o rozměrech 20x20x100 mm bylo použito zařízení, kde obě broušené plochy byly pevně umístěny ve stavivu a jejich velikost byla přizpůsobena velikostem trámečků, tj. měly rozměr 20x20 mm. Lisovací plocha tedy byla 400 mm². Zkušební lis musí vyvinout sílu 20 až 600 kN s přesností 3 %. Každé dva roky musí být úředně prověřen.⁹

Pohyblivá část stavivu musí být snadno posuvná. Zarážka vymezující uložení části trámečku na zkušební plošky musí být 3 mm \pm 1,5 mm za spodní ploškou.

Pevnost v tlaku byla zkoušena na zlomcích trámečků (předtím použitých na zjištění pevnosti v ohybu). Očištěné zlomky byly položeny bočními plochami mezi obě destičky, přičemž se rovnou čelní stranou dorazí k zarážce. Po kontrole uložení a nastavení ploch byly zlomky trámečků zatěžovány. Nárůst tlaku na plochu trámečku tj. 400mm² byl postupný a zatěžování nebylo ukončeno dříve než za 10 s.



Obrázek 8
Přístroj na měření pevnosti v tlaku



Obrázek 9

Ukázka měření pevnosti v tlaku

Při výpočtu pevnosti v tlaku se použije vzorec (pro velikost trámečků 20x20x100 mm):

$$\sigma_{Pd} = F \cdot 2,5$$

kde σ_{Pd} pevnost v tlaku v MPa
 F síla nutná k porušení zlomku trámečku v kN⁹

3.2.3 Měření na Graf-Kaufmanově přístroji:

Podstatou zkoušky je měření podélné deformace v ose trámečku v různých časových intervalech po dobu tvrdnutí betonu. Pokud se délka trámečku zmenšuje, jde o smršťování, pokud se délka zvětšuje, jde o roztažnost. Počáteční délka je změřena při odformování tělesa. Vlastní měření se provádí na trámečcích o rozměru 40x40x160 mm se zabudovanými měřicími kontakty v podélné ose trámečku. Změna délky trámečku je odečítána na dilatometru.⁹



Obrázek 10

Graf - Kaufmanův přístroj



Obrázek 111

Ukázka mých trámečků s přídatkem exp. složky SC-20

4 Výsledky a diskuze

Následující stě popisují a vyhodnocují provedené experimenty a diskutují jejich výsledky. Byl testován vliv výztuží a jejich kombinací na pevnostní charakteristiky vysokohodnotných systémů s vyztužením. Současně byly testovány příměsi pro eliminaci smrštění.

V práci se provedlo míchání a měření nejprve vzorků pouze s výztuží, až další měření spočívalo v přidavku expanzní složky SC - I (5%, 10%, 30%) a expanzní složky CSA - 20 (5%, 10%, 30%). Následně byly testovány pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu a měřena jejich délka.

4.1 Použité suroviny

Secutec©	speciální vysokopevnostní cement
Suk	velmi jemně mletý křemen
Bauxit	kamenivo (zrnitost 0-1 mm)
Exp. složka SC - I	expanzní složka na bázi anhydritu
Exp. složka CSA - 20	expanzní složka na bázi hlinitanu

Výztuže

- Mosazné drátky
- Uhlíková vlákna
- Fe-prach a Fe-hoblíny
- Kuralon (PVA vlákna)

Destilovaná voda

4.2 Testy na RPC kompozitech bez expanzní složky

Jako výztuže byly použity mosazné vlákna, uhlíkové vlákna, Fe prach společně s Fe hoblinami, Kuralon. Poslední vzorek byl bez výztuže. Vzorky byly namíchány podle tabulky 6, která je zde uvedena. Při míchání musela být vždy ještě dodána trocha voda, než původních 99 ml.

Tabulka 6

Tabulka na míchání směsí

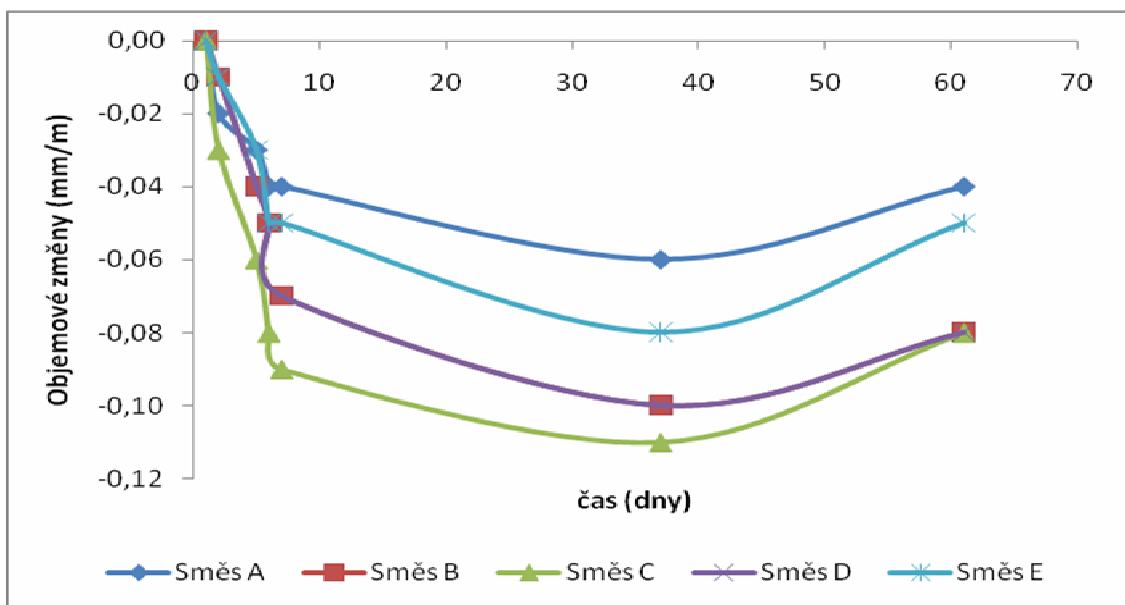
	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	440	440	440	440	440
Suk (g)	110	110	110	110	110
Bauxit - 0-1 mm (g)	485	385	385	385	385
Voda (ml)	145	115	122	138	119
Mosazné drátky - 6 mm (g)	325	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Po smíchání byl vzorek vložen do ocelových forem, které byly uchyceny na vibračním stole. Tahle část musela být prováděna ihned po domíchání, protože směs tvrdla a kdyby byla ponechána déle stát, tak by její vkládání do forem bylo obtížné. Vibrační stůl pomohl k tomu, aby ze vzorku unikly bubliny, které se tam dostaly při plnění forem, aby vzorek vyplnil veškeré štěrby. Délka byla měřena pravidelně první týden a následně co jeden měsíc.

Tabulka 7

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dny	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,02	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01
5	-0,03	-0,04	-0,06	-0,04	-0,03
6	-0,04	-0,05	-0,08	-0,05	-0,05
7	-0,04	-0,07	-0,09	-0,07	-0,05
37	-0,06	-0,10	-0,11	-0,10	-0,08
61	-0,04	-0,08	-0,08	-0,08	-0,05



Obrázek 12

Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

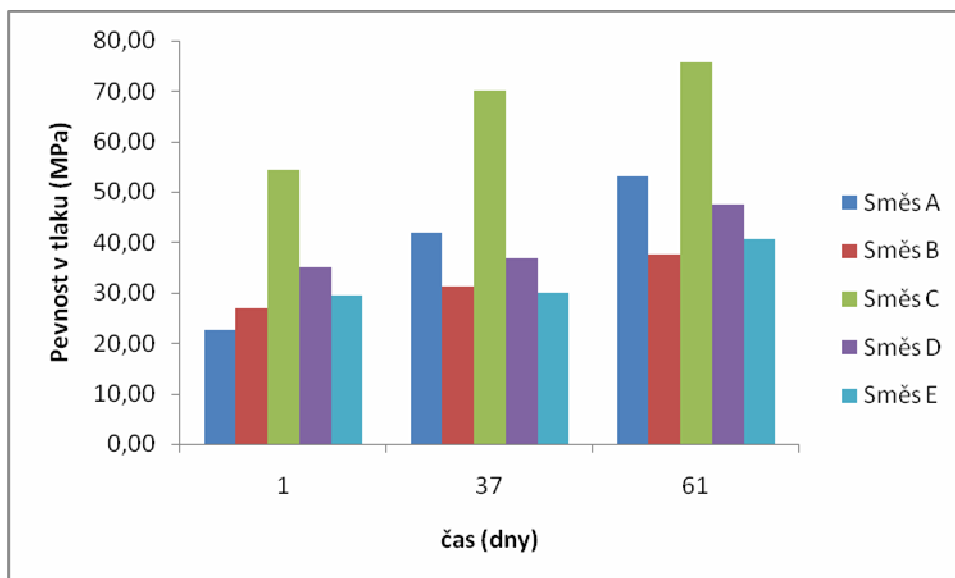
Graf na obrázku 12 reprezentuje schopnost jednotlivých přidávaných výztuží eliminovat smrštění. I když všechny naměřené hodnoty jsou záporné, tak lze tvrdit, že nejlepší schopnost eliminovat smrštění z testovaných výztuží vykazují mosazné drátky.

Zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 33 a 61 den

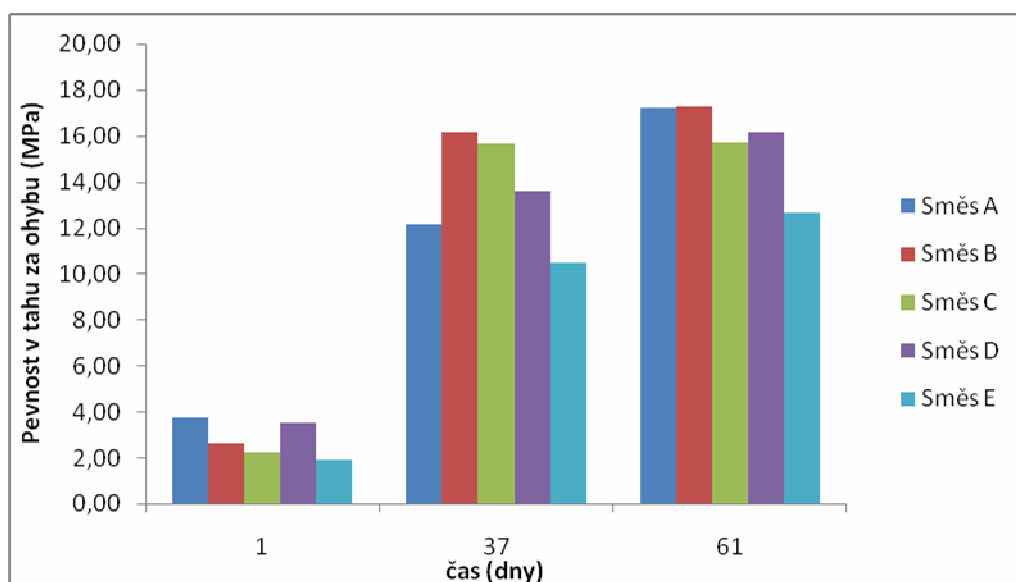
Tabulka 8

Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{Po} (MPa)	σ_{Pd} (MPa)
1	A	3,71	22,50
1	B	2,65	26,88
1	C	2,21	54,38
1	D	3,53	35,00
1	E	1,87	29,38
37	A	12,13	41,88
37	B	16,17	31,25
37	C	15,66	70,00
37	D	13,60	36,88
37	E	10,47	30,00
61	A	17,20	53,13
61	B	17,27	37,50
61	C	15,69	75,63
61	D	16,17	47,50
61	E	12,64	40,63



Obrázek 13
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 14
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

V grafu z obrázku 13 je vidět jak směs C (Fe hobliny a Fe prach) již od prvního dne má největší pevnost v tlaku. Její hodnota byla při každém měření větší.

Největší rozdíl měření pevnosti v tahu za ohybu byl mezi prvním a 37 dnem, při měření v 61 dnu už takový skok v pevnosti nebyl. Naměřené hodnoty jsou přibližně stejné. V tomto měření vyčnívala s největší pevností Směs B (s přidavkem uhlíkových vláken).

4.3 Testy na RPC kompozitech s přídavkem 5% expanzní složky SC - I

U těchto vzorků bylo k výztužím přidáno 5% expanzní složky SC - I. Přidané množství expanzní složky bylo odečteno z množství speciálního pojiva Secutec. (jak je ukázáno v tabulce 9). Při míchání bylo přidáno o hodně více vody, než v předchozím případě, protože směs tuhly extrémně rychle. Plnění do forem muselo být prováděno velice rychle, protože by vzorky ztuhly a nebyly by použitelné.

Tabulka 9

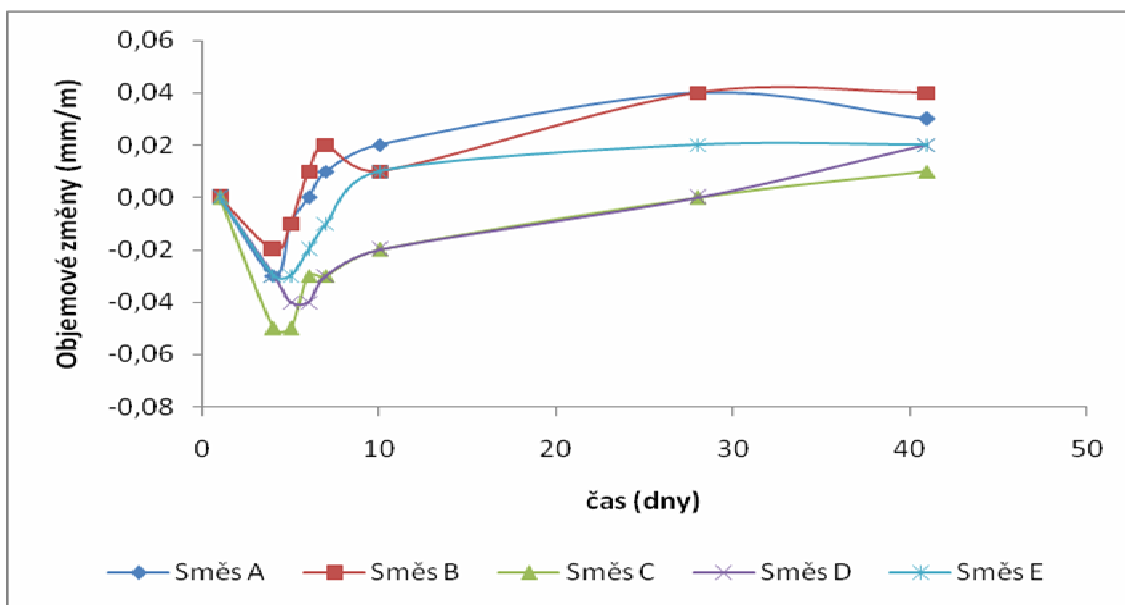
Tabulka na míchání směsí

Exp. složka SC - I 5%	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	380	380	380	380	380
Suk (g)	100	100	100	100	100
Bauxit - 0-1 mm (g)	350	350	350	350	350
Voda (ml)	215	190	195	235	227
Exp. složka SC - I (g)	20	20	20	20	20
Mosazné drátky – 6 mm (g)	250	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Tabulka 10

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dny	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-0,03	-0,02	-0,05	-0,03	-0,03
5	-0,01	-0,01	-0,05	-0,04	-0,03
6	0,00	0,01	-0,03	-0,04	-0,02
7	0,01	0,02	-0,03	-0,03	-0,01
10	0,02	0,01	-0,02	-0,02	0,01
28	0,04	0,04	0,00	0,00	0,02
41	0,03	0,04	0,01	0,02	0,02



Obrázek 15

Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

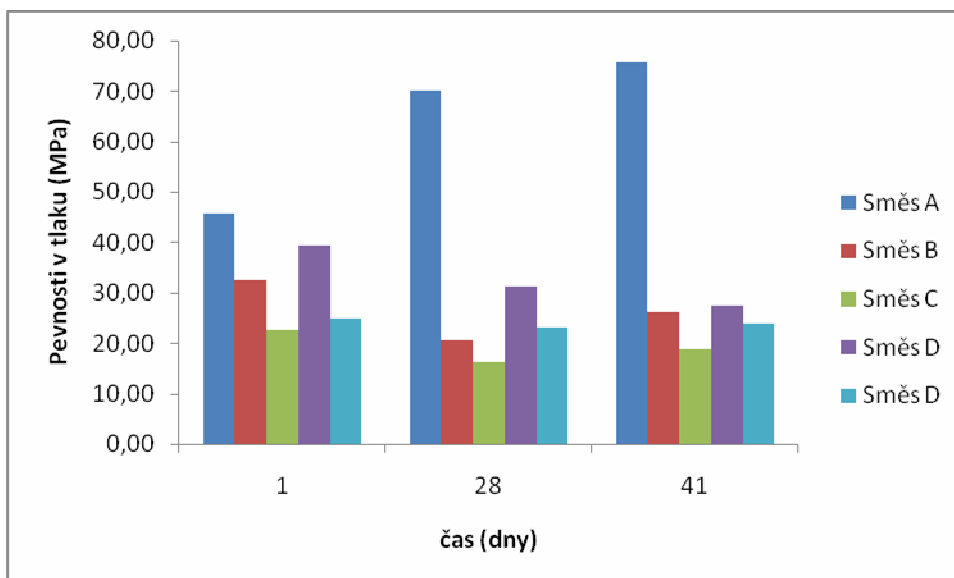
Z obrázku 15 lze vyčíst, že z testovaných výztuží nejlépe eliminuje smrštění opět Směs A (mosazné drátky). Od 10 dne všechny složky expandují

Zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 28 a 41 den

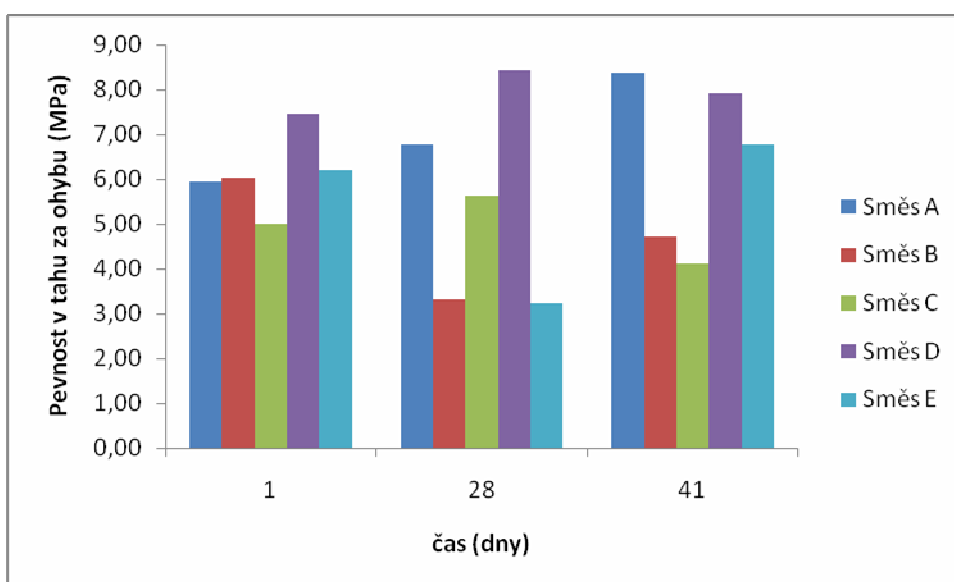
Tabulka 11

Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{p0} (MPa)	σ_{pd} (MPa)
1	A	5,95	45,63
1	B	6,03	32,50
1	C	5,00	22,50
1	D	7,46	39,38
1	E	6,21	25,00
28	A	6,76	70,00
28	B	3,31	20,63
28	C	5,62	16,25
28	D	8,42	31,25
28	E	3,23	23,13
41	A	8,38	75,63
41	B	4,70	26,25
41	C	4,12	18,75
41	D	7,90	27,50
41	E	6,76	23,75



Obrázek 16
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 17
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

Bylo vypořádováno, že největší pevnosti v tlaku dosáhla směs A (mosazné vlákna). Pevnost je vysoká díky dlouhým mosazným vláknům. Stejně tak byly naměřeny velké pevnosti v tahu za ohybu u směsí s vlákny, což je Směs A a Směs D. Směs D zde má nejvyšší hodnoty. Ostatní výztuže nejsou vláknité, proto mají menší pevnosti.

4.4 Testy na RPC kompozitech s přídatkem 10% expanzní složky SC - I

Do této směsi bylo přidáno mimo základní složky i 10% expanzní složky SC- I . Zde muselo být přidáno také více vody. Směs rychle tuhla, tím pádem se s ní muselo pracovat rychle.

Tabulka 12

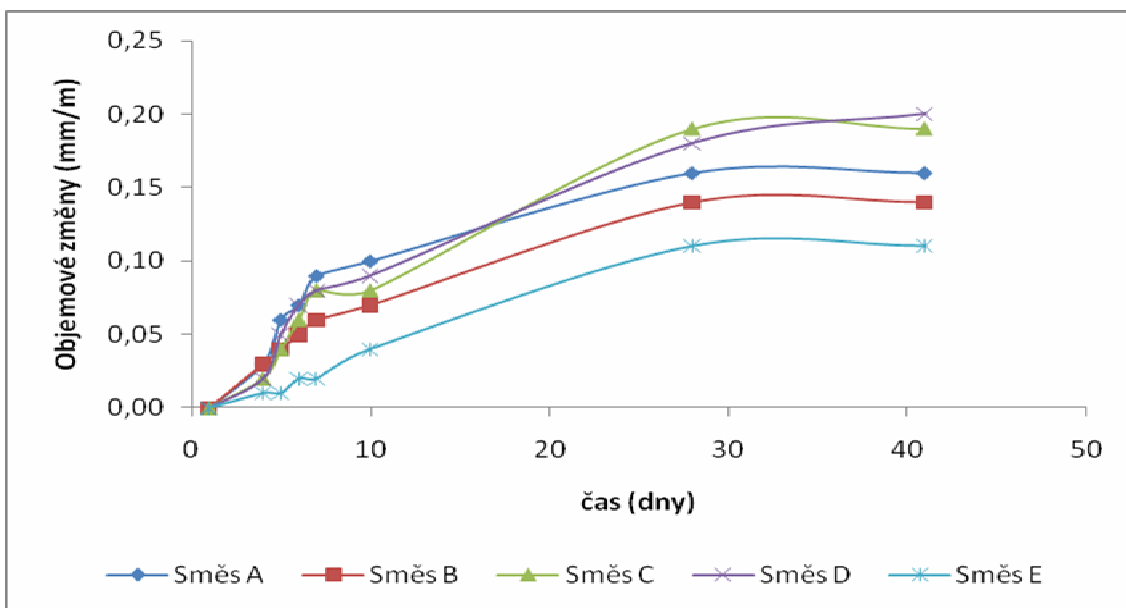
Tabulka na míchání směsí

Exp. složka SC - I 10%	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	360	360	360	360	360
Suk (g)	100	100	100	100	100
Bauxit - 0-1 mm (g)	350	350	350	350	350
Voda (ml)	206	205	205	205	190
Exp. složka SC - I (g)	40	40	40	40	40
Mosazné drátky – 6 mm (g)	250	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Tabulka 13

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dny	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
5	0,06	0,04	0,04	0,05	0,01
6	0,07	0,05	0,06	0,07	0,02
7	0,09	0,06	0,08	0,08	0,02
10	0,10	0,07	0,08	0,09	0,04
28	0,16	0,14	0,19	0,18	0,11
41	0,16	0,14	0,19	0,20	0,11



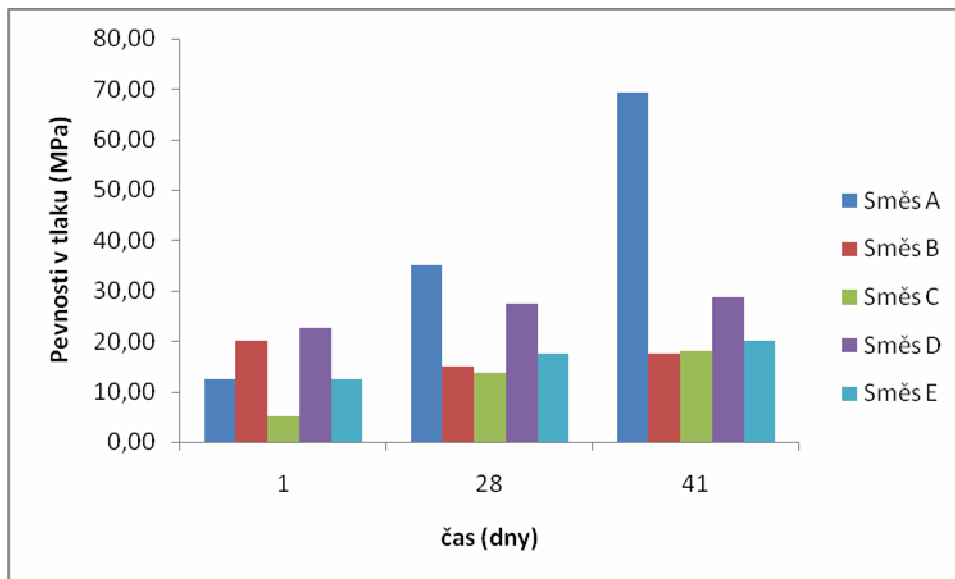
Obrázek 18
Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

Na obrázku 18 lze vidět, že tyto směsi mají nejmenší expanzi v rozmezí od 0 do 0,2 mm/m. Proto se jeví jako nejlépe využitelné směsi s obsahem expanzní složky SC - I.

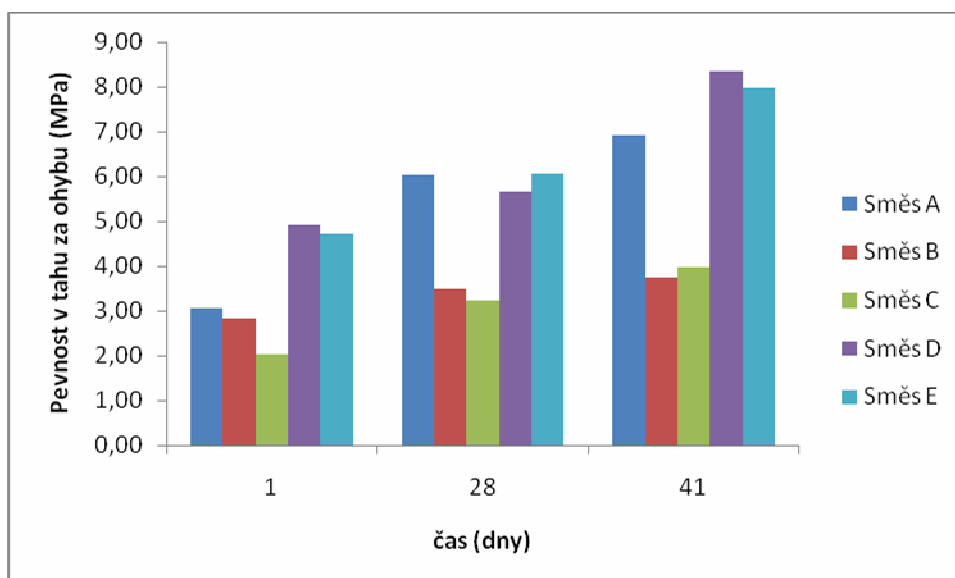
Zkoušky pevnost v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 28 a 41 den

Tabulka 14
Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{p0} (MPa)	σ_{pd} (MPa)
1	A	3,05	12,50
1	B	2,83	20,00
1	C	2,02	5,00
1	D	4,92	22,50
1	E	4,70	12,50
28	A	6,03	35,00
28	B	3,49	15,00
28	C	3,23	13,75
28	D	5,66	27,50
28	E	6,06	17,50
41	A	6,91	69,38
41	B	3,75	17,50
41	C	3,97	18,13
41	D	8,34	28,75
41	E	7,97	20,00



Obrázek 19
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 20
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

Největší pevnost byla naměřena u Směsi A. Její nárůst pevnosti s časem byl největší. Opět u směsí s vlákny byly pevnosti v tlaku nejvyšší.

U Směsi D byla naměřena nejvyšší hodnota pevnosti v tahu za ohybu.

4.5 Testy na RPC kompozitech s přídavkem 30% expanzní složky SC - I

Při dalším míchání byl procentuálně zvednut obsah expanzní složky SC - I na 30%. K těmto vzorkům už nebyla potřeba takového množství vody jako v předešlých dvou případech. Tuhnutí bylo o něco málo pomalejší.

Tabulka 15

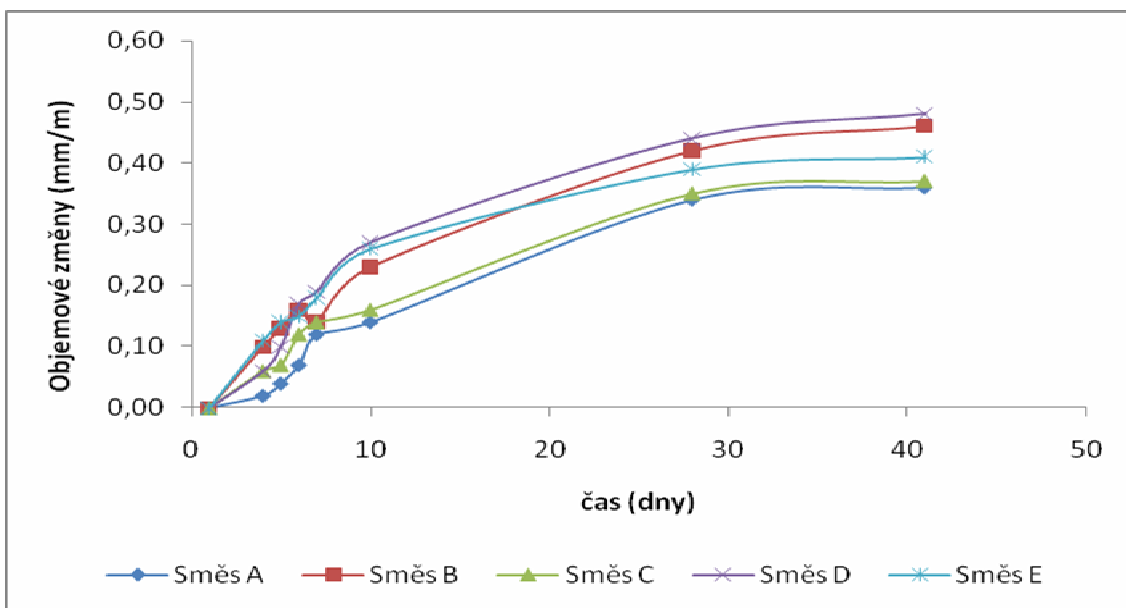
Tabulka na míchání směsí

Exp. složka SC - I 30%	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	280	280	280	280	280
Suk (g)	100	100	100	100	100
Bauxit - 0-1 mm (g)	350	350	350	350	350
Voda (ml)	290	205	205	220	220
Exp. složka SC - I (g)	120	120	120	120	120
Mosazné drátky – 6 mm (g)	250	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Tabulka 16

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dny	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,02	0,10	0,06	0,06	0,11
5	0,04	0,13	0,07	0,10	0,14
6	0,07	0,16	0,12	0,17	0,15
7	0,12	0,14	0,14	0,19	0,18
10	0,14	0,23	0,16	0,27	0,26
28	0,34	0,42	0,35	0,44	0,39
41	0,36	0,46	0,37	0,48	0,41



Obrázek 21
Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

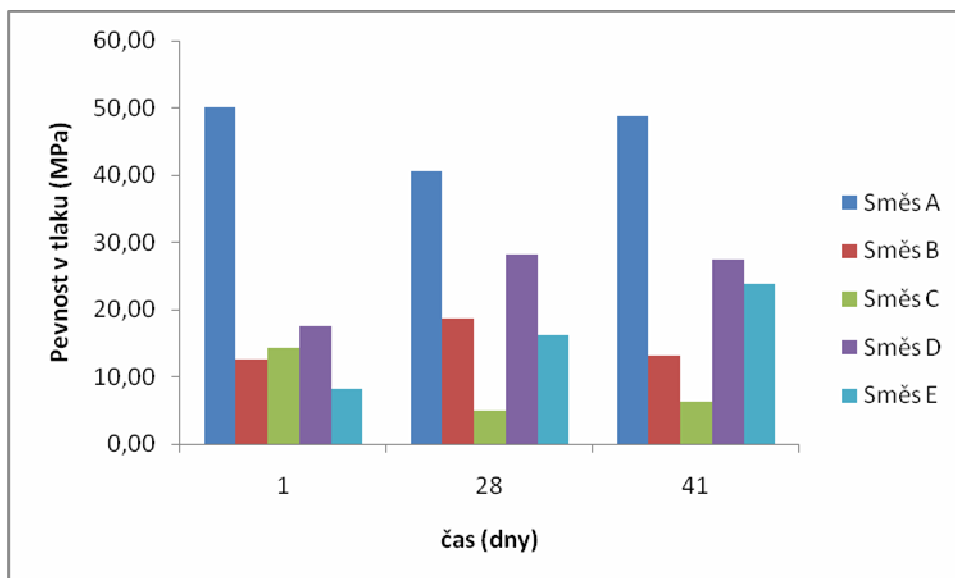
V tomto měření byla pozorována největší expanze s použitím exp. složky SC - I. Nejmenší hodnoty byly naměřeny u Směsi C (Fe prach a Fe hobliny). Expanze v takové velikosti už není příliš vhodná.

Zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 28 a 41 den

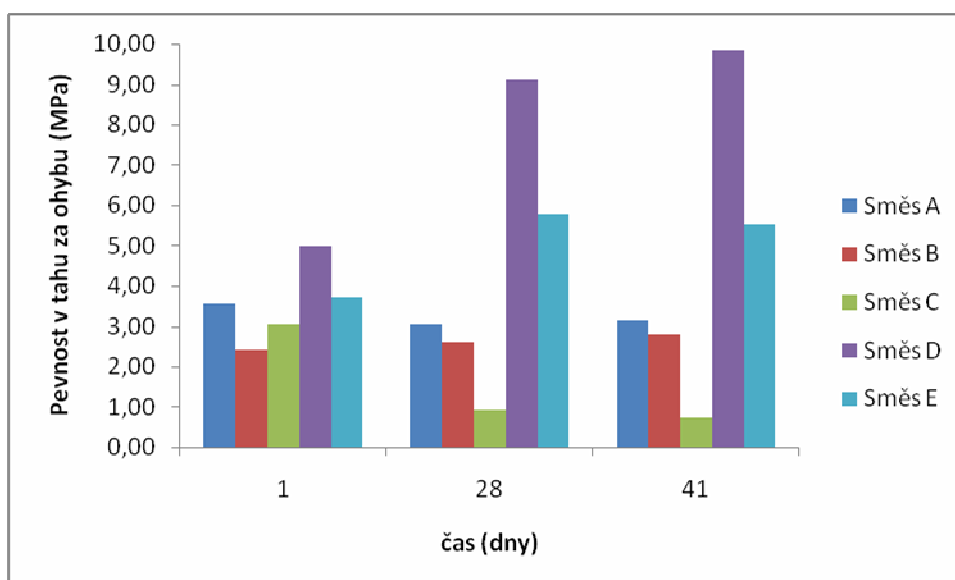
Tabulka 17

Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{p0} (MPa)	σ_{pd} (MPa)
1	A	3,56	50,00
1	B	2,43	12,50
1	C	3,05	14,38
1	D	5,00	17,50
1	E	3,71	8,13
28	A	3,06	40,63
28	B	2,61	18,75
28	C	0,92	5,00
28	D	9,11	28,13
28	E	5,77	16,25
41	A	3,16	48,75
41	B	2,79	13,13
41	C	0,74	6,25
41	D	9,85	27,50
41	E	5,51	23,75



Obrázek 22
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 23
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

Opět důkaz toho, že u směsí s vlákny byly naměřeny nejvyšší hodnoty. V pevnosti v tlaku to bylo Směsi A a v pevnosti v tahu za ohybu u směsi D.

Nejmenších hodnot jak v tlaku, tak i v tahu za ohybu u všech směsí s přídavkem expanzní složky SC - I dosáhla Směs C (Fe prach a Fe hobliny). Expanzní složka obsahuje síran (kyselý), proto je Fe nestabilní a má špatné pevnostní vlastnosti.

4.6 Testy na RPC kompozitech s přídavkem 5% expanzní složky CSA - 20

V tomto míchání byla změněna expanzní složka z SC - I na CSA - 20, jinak výztuže a suroviny zůstaly stejné, akorát v jiném poměrovém složení.

Tabulka 18

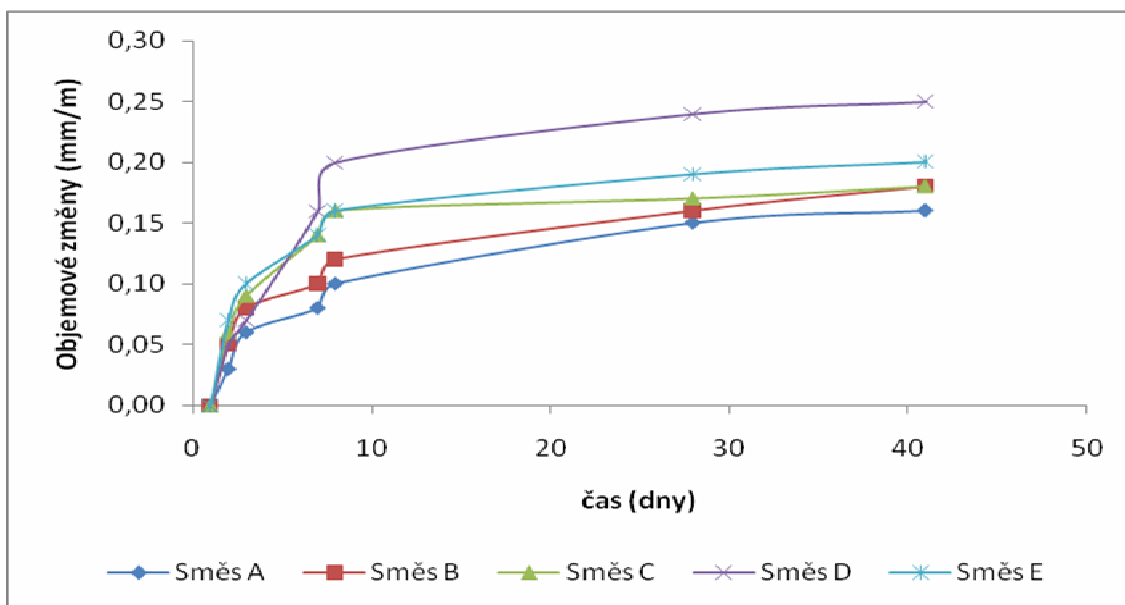
Tabulka na míchání směsí

Exp. složka CSA - 20 5%	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	380	380	380	380	380
Suk (g)	100	100	100	100	100
Bauxit - 0-1 mm (g)	350	350	350	350	350
Voda (ml)	115	90	95	135	90
Exp. složka CSA - 20 (g)	20	20	20	20	20
Mosazné drátky – 6 mm (g)	250	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Tabulka 19

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dny	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,03	0,05	0,06	0,05	0,07
3	0,06	0,08	0,09	0,07	0,10
7	0,08	0,10	0,14	0,16	0,14
8	0,10	0,12	0,16	0,20	0,16
28	0,15	0,16	0,17	0,24	0,19
41	0,16	0,18	0,18	0,25	0,20



Obrázek 24

Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

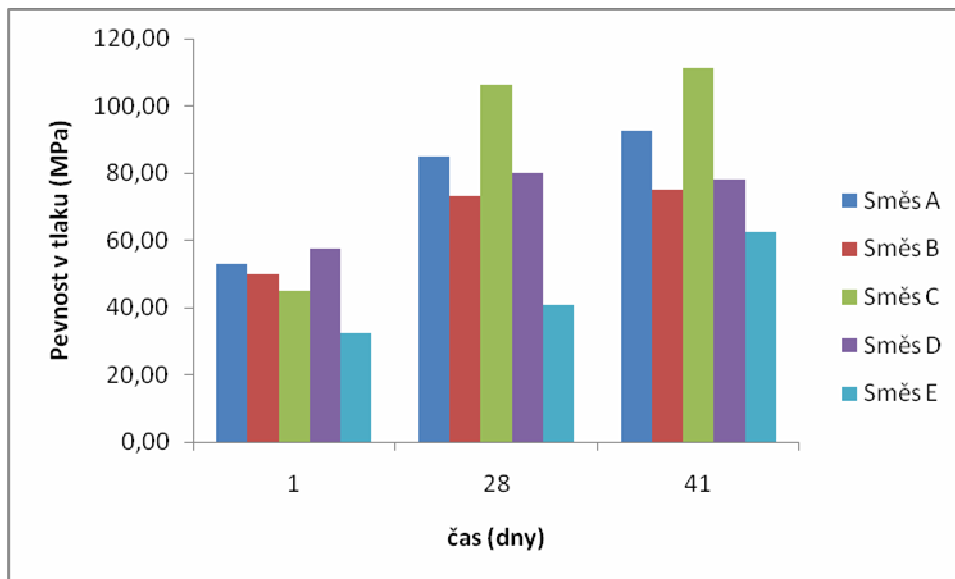
Z grafu na obrázku 24 bylo zjištěno, že expanze je přijatelná v rozmezí 0 až 25 mm/m. V tomto měření byla nejlepší Směs B (uhlíková vlákna).

Zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 28 a 41 den

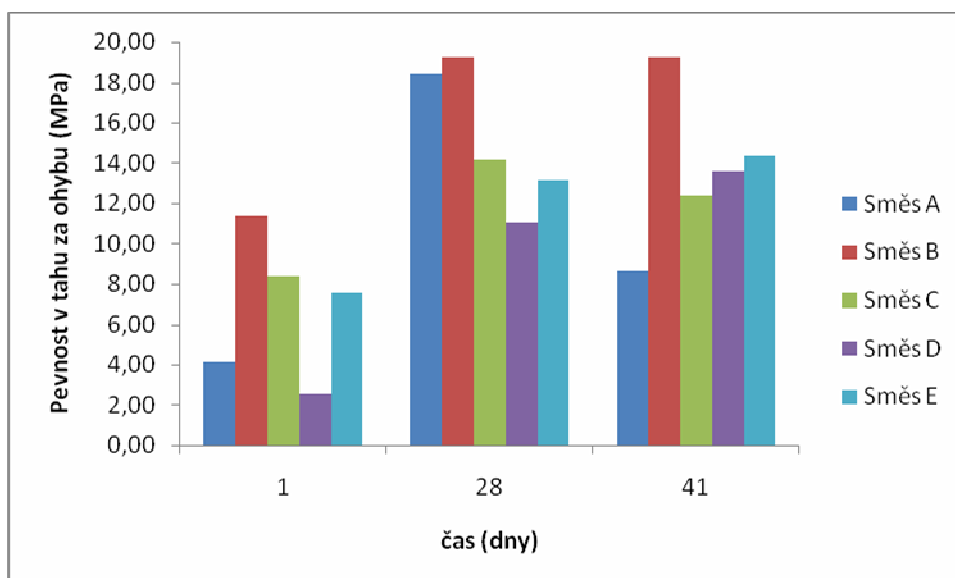
Tabulka 20

Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{p0} (MPa)	σ_{pd} (MPa)
1	A	4,12	53,13
1	B	11,39	50,00
1	C	8,42	45,00
1	D	2,57	57,50
1	E	7,57	32,50
28	A	18,45	85,00
28	B	19,56	73,13
28	C	14,19	106,25
28	D	11,03	80,00
28	E	13,16	40,63
41	A	8,67	92,50
41	B	19,26	75,00
41	C	12,42	111,25
41	D	13,60	78,13
41	E	14,33	62,50



Obrázek 25
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 26
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

Po přidavku expanzní složky CSA - 20 dosahovaly hodnoty směsí jak v pevnosti v tlaku, tak i v tahu za ohybu vyšších čísel, než s přidavkem exp. složky SC - I. V pevnosti v tlaku byla nejvyšší hodnota naměřena u Směsi C. Pevnosti u všech směsí s postupem času rostly.

V pevnosti v tahu za ohybu byla nejvyšší hodnota naměřena u Směsi B ve 28 dnu.

4.7 Testy na RPC kompozitech s přídavkem 10% expanzní složky CSA - 20

Při míchání byla opět zvýšena procenta obsahu expanzní složky CSA - 20 na 10%.

Tabulka 21

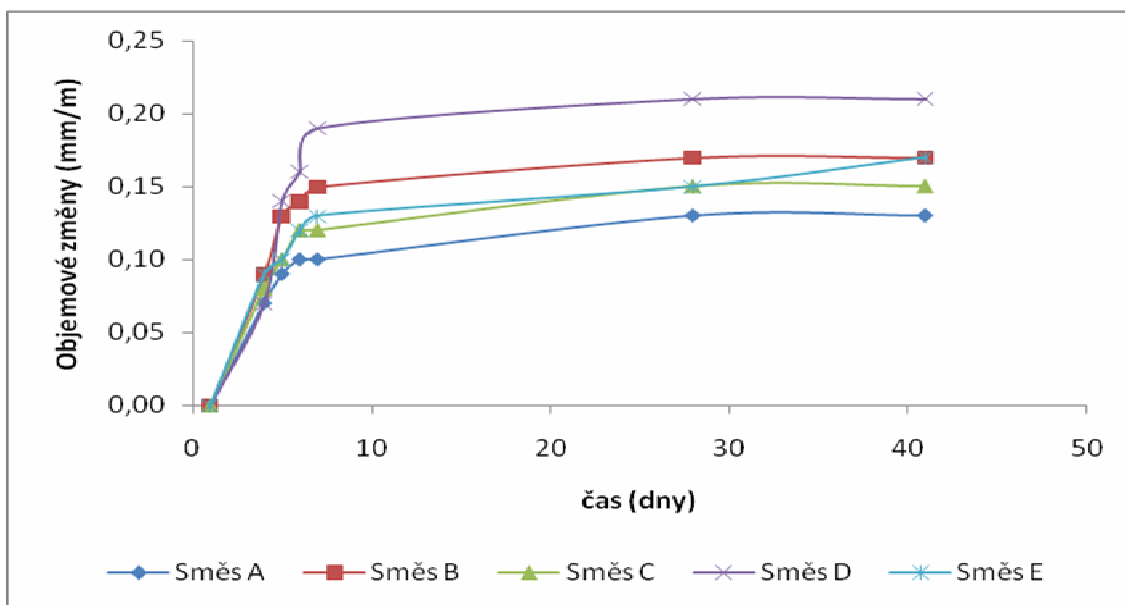
Tabulka na míchání směsí

Exp. složka CSA - 20 10%	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	360	360	360	360	360
Suk (g)	100	100	100	100	100
Bauxit - 0-1 mm (g)	350	350	350	350	350
Voda (ml)	102	90	90	140	90
Exp. složka CSA - 20 (g)	40	40	40	40	40
Mosazné drátky – 6 mm (g)	250	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Tabulka 22

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dny	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,07	0,09	0,08	0,07	0,09
5	0,09	0,13	0,10	0,14	0,10
6	0,10	0,14	0,12	0,16	0,12
7	0,10	0,15	0,12	0,19	0,13
28	0,13	0,17	0,15	0,21	0,15
41	0,13	0,17	0,15	0,21	0,17



Obrázek 27

Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

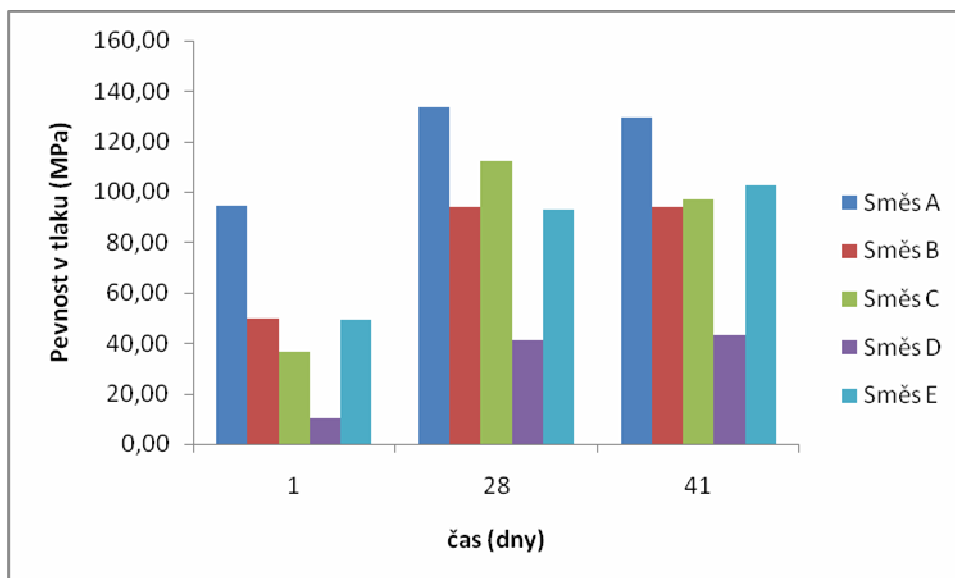
Z obrázku 27 bylo vyčteno, že směsi opět dosahují malých expanzí v rozmezí 0 až 20 mm/m. S nejmenší expanzí zde byla výztuž Fe prach a Fe hobliny. Expanze nabývá největších hodnot v 7 dnu a poté už se moc nemění.

Zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 28 a 41 den

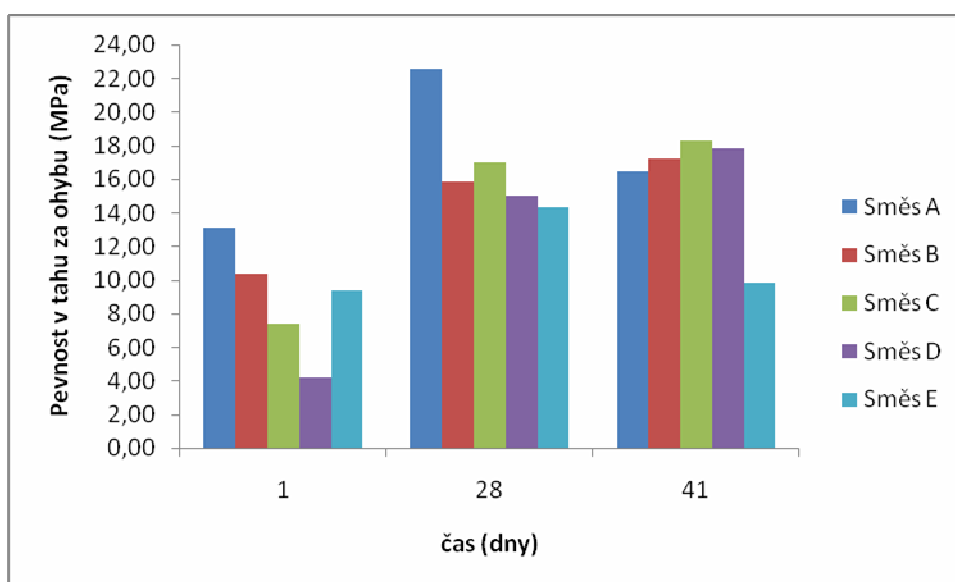
Tabulka 23

Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{p0} (MPa)	σ_{pd} (MPa)
1	A	13,08	94,38
1	B	10,36	50,00
1	C	7,42	36,50
1	D	4,19	10,00
1	E	9,41	49,38
28	A	22,53	133,75
28	B	15,88	93,75
28	C	16,98	112,50
28	D	14,99	41,25
28	E	14,33	93,13
41	A	16,46	129,38
41	B	17,20	93,75
41	C	18,26	96,88
41	D	17,82	43,13
41	E	9,85	102,50



Obrázek 28
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 29
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

U těchto směsí byly dosaženy nejvyšší hodnoty z celého měření. V tlaku byly nejvyšší hodnoty u Směsi A. Je zde i pozorován velký pevnostní skok mezi 1 a 28 dnem, poté se už hodnoty příliš neliší.

V tahu za ohybu byla nejvyšší hodnota naměřena u Směsi A. Opět velký pevnostní skok mezi 1 a 28 dnem.

4.8 Testy na RPC kompozitech s přídavkem 30% expanzní složky CSA -20

V posledním měření byl obsah expanzní složky CSA - 20 zvýšen na 30%.

Tabulka 24

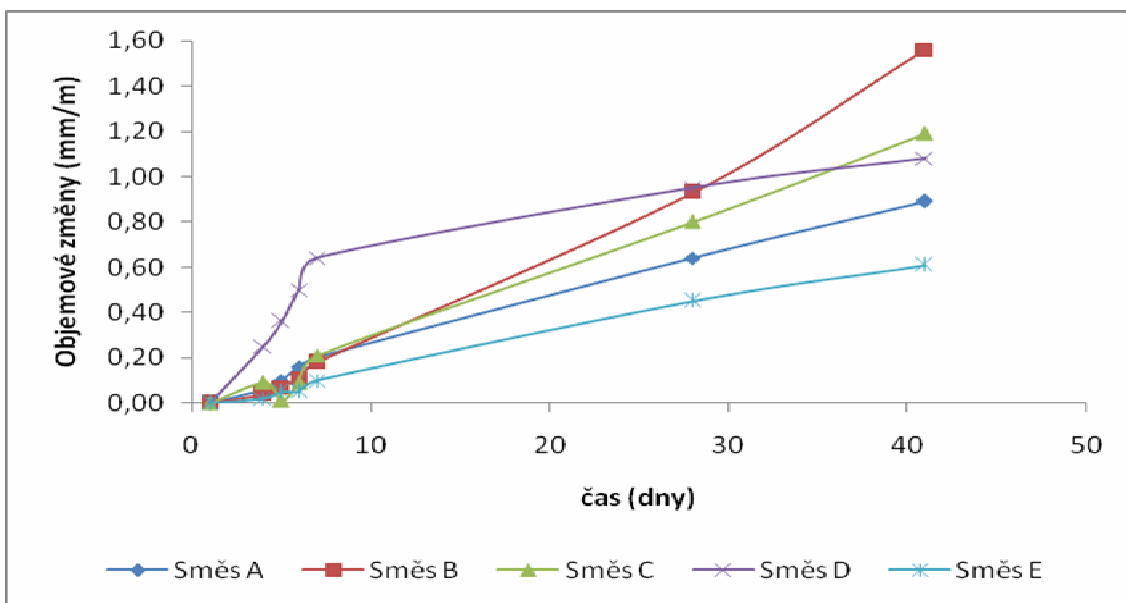
Tabulka na míchání směsí

Exp. složka CSA - 20 30%	Směs A	Směs B	Směs C	Směs D	Směs E
Secutec (g)	280	280	280	280	280
Suk (g)	100	100	100	100	100
Bauxit - 0-1 mm (g)	350	350	350	350	350
Voda (ml)	95	95	100	165	90
Exp. složka CSA - 20 (g)	120	120	120	120	120
Mosazné drátky – 6 mm (g)	250	-	-	-	-
Uhlíkové vlákno - 6 mm (g)	-	1,5	-	-	-
Fe-prach (g)	-	-	166,7	-	-
Fe-drátky - 4 mm (g)	-	-	83,3	-	-
Kuralon - 6 mm (g)	-	-	-	15	-

Tabulka 25

Rozdíly délek jednotlivých trámečků

dný	Směs A (mm)	Směs B (mm)	Směs C (mm)	Směs D (mm)	Směs E (mm)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,06	0,04	0,09	0,25	0,02
5	0,10	0,07	0,01	0,36	0,05
6	0,16	0,11	0,09	0,50	0,05
7	0,20	0,18	0,21	0,64	0,10
28	0,64	0,93	0,80	0,95	0,45
41	0,89	1,56	1,19	1,08	0,61



Obrázek 30

Grafické znázornění objemových změn v časové závislosti

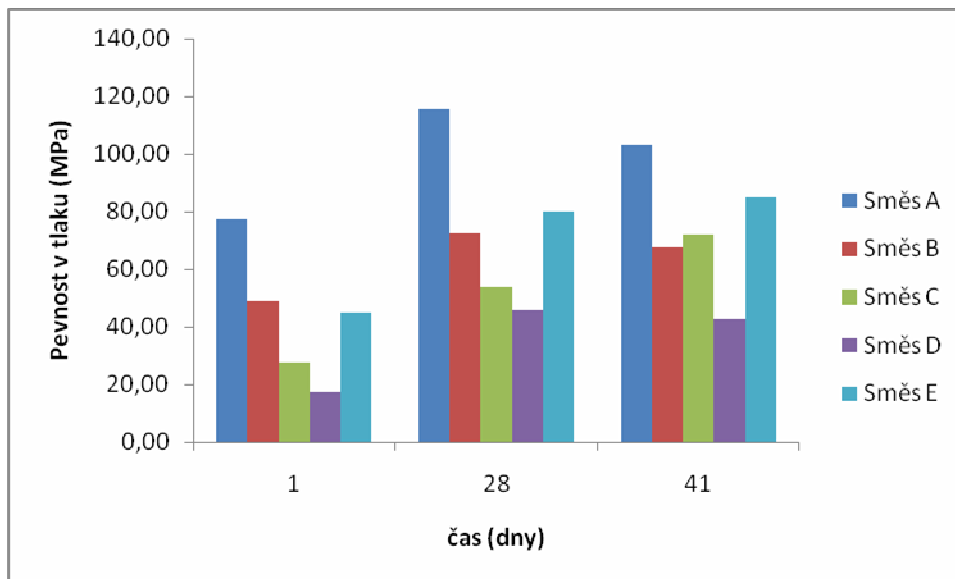
U tohoto měření byla expanze nejvyšší. Směsi s přidavkem exp. složky s 30 % nejsou tak vhodné, jako směsi s přidavkem 10 %. Nejmenší expanze byla pozorována u Směsi A.

Zkoušky pevností v tlaku a tahu za ohybu byly prováděny v první den vytažení vzorků z forem, dále 28 a 41 den

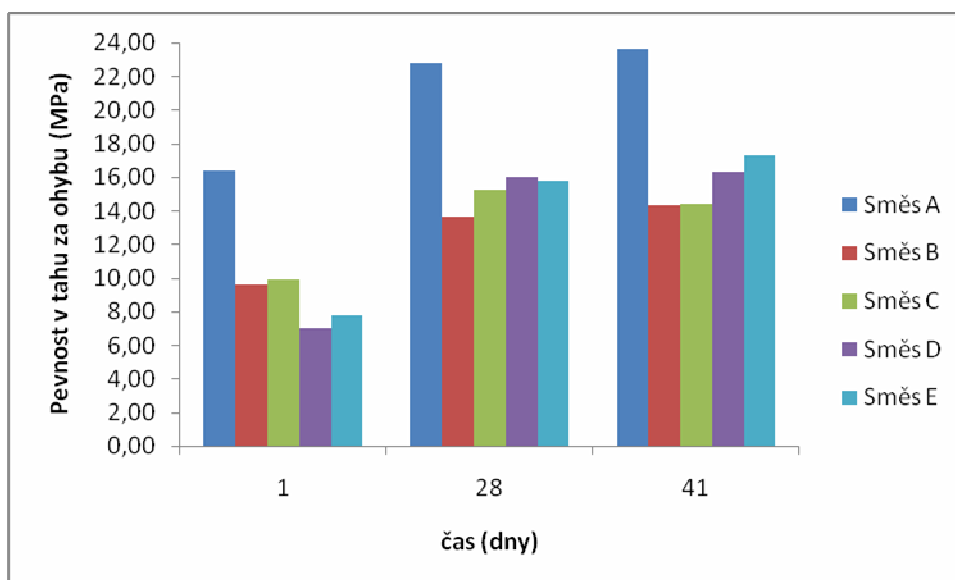
Tabulka 26

Celkové hodnocení pevností

d	označ.	σ_{p0} (MPa)	σ_{pd} (MPa)
1	A	16,39	77,50
1	B	9,63	48,75
1	C	9,92	27,50
1	D	7,02	17,50
1	E	7,75	45,00
28	A	22,79	115,63
28	B	13,63	72,50
28	C	15,21	53,75
28	D	16,00	45,63
28	E	15,80	80,00
41	A	23,63	100,13
41	B	14,33	67,50
41	C	14,41	71,88
41	D	16,33	42,50
41	E	17,27	85,00



Obrázek 31
Vývoj pevností v tlaku časové závislosti



Obrázek 32
Závislost pevnosti v tahu za ohybu na čase

Směs A zde dosáhla vysokých hodnot jak v pevnosti v tlaku, tak i v pevnosti v tahu za ohybu. Avšak hodnoty nebyly tak velké, jako v předchozím případě. Obě pevnosti se nejvíce měnily mezi 1 a 28 dnem, poté byly pevnosti přibližně stejné, jen s malými změnami.

5 Závěr

Tato práce se zabývala výrobou betonů s vhodným použitím příměsí a výztuží tak, aby byly jejich pevnosti co nejvyšší, avšak současně bylo potlačeno smrštění při tuhnutí a tvrdnutí. Na potlačení smrštění byly testovány přísady komerčně dodávaných expanzních přísad Denka SC - I a Denka CSA – 20. Snaha potlačit smrštění expanzní složkou pramenila z faktu, že takovýto směs lze s úspěchem používat při vyplňování ocelových trub, či jiných konstrukčních prvků, na které jsou kladeny extrémní požadavky na mechanické vlastnosti.

Byly testovány 3 druhy vzorků. Bez přísady expanzní složky (srovnávací), následně vzorky s přísadou expanzní složky SC - I (procenta obsahu 5%, 10%, 30%), stejně tak přísadou expanzní složky CSA – 20. Každý vzorek byl testován pro čtyři druhy výztuží (mosazné drátky, uhlíkové vlákno, Fe prach a Fe hobliny, Kuralon).

V první sérii bez přísady příměsí se jako nejlepší vzorek s největší pevností v tlaku jeví Směs C (jeho maximální pevnost dosahuje více než 75 MPa) a pevnost v tahu za ohybu Směs B (s nejvyšší hodnotou přes 17 MPa).

V sérii s přísadou příměsí 5 % expanzní složky SC - I je nejlepší vzorek s největší pevností v tlaku Směs A s mosaznými drátky (jeho maximální pevnost je až 75 MPa) a v pevnosti v tahu za ohybu Směs D (s nejvyšší hodnotou přes 8 MPa).

S následným zvýšením přísady expanzní složky na 10 %. U vzorků s přísadou složky SC-I, nedošlo k výraznému posunu mechanických vlastností, avšak u vzorků kde byla přidána expanzní složka CSA – 20 došlo ke poměrně výraznému nárůstu pevností v tlaku i v tahu za ohybu.

Při dalším zvyšování přísady složky CSA - 20 až na 30 % hmot se hodnoty zjišťovaných pevností již výrazněji neměnily. Složka SC-I nijak zásadní vliv na pevnosti neměla, avšak byla schopna potlačit nežádoucí smrštění.

Celkově můžeme říci, že při testování expanzních složek bylo dosaženo velice uspokojivých výsledků v otázce eliminace smrštění, kdy až na výjimky všechny vzorky s přísadou expanzní složky vykazovaly mírnou roztažnost, což je pro zamýšlené aplikace žádoucí.

Z hlediska pevnostních charakteristik, můžeme tvrdit, že přísada složky SC - I nemá na ně nijak významný vliv. Avšak vhodný přísada testované složky CSA – 20 pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu poměrně zásadně posouvá směrem nahoru.

Celkově můžeme konstatovat, že nejvhodnějším řešením pro dané náročné aplikace je systém s přísadou 10 % expanzní složky, se všemi testovanými výztužemi v kombinaci i samostatně s výjimkou PVA vláken Kuralon kde nebylo vysokých pevnostních charakteristik dosaženo. Tyto testované vzorky dosahovaly požadovaných pevností a současně u nich bylo potlačeno nežádoucí smrštění, což bylo cílem práce.

6 Požitá literatura

¹ AÏTCIN, Pierre-Claude . *Vysokohodnotný beton*. červen 2005. Praha 4 ČKAIT: [s.n.], 2005. 320 s. ISBN 80-86769-39-9.

² HLAVÁČ, Jan . *Základy technologie silikátů 2*. upravené vydání. Praha : SNTL, 1988. 520 s.

³ KRATOCHVÍL, DrSc., Prof. RNDr. Bohumil; ŠVORČÍK, DrSc, Prof. Ing. Václav ; VOJTĚCH, Doc. Dr. Ing. Dalibor. *Úvod do studia materiálů*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4.

⁴ Portlandsk%C3%BD cement In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Portlandsk%C3%BD_cement>

⁵ [Http://waste.fce.vutbr.cz/](http://waste.fce.vutbr.cz/) [online]. 2010 [cit. 2010-05-01]. Energosádrovec. Dostupné z WWW: <<http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/energosadrovec.html>>.

⁶ [Http://geologie.vsb.cz/](http://geologie.vsb.cz/) [online]. 2010 [cit. 2010-05-01]. Anorganická pojiva. Dostupné z WWW: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html>.

⁷ KARFÍKOVÁ, M.; HAVLICA, J. Imobilizace odpadních iontů ve struktuře ettringitu. *Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology* [online]. 1998, vol. 6, no. 1, [cit. 2010-05-01]. Dostupný z WWW: <www.xray.cz/ms/bul99-1/havlica.pdf>.

⁸ [Www.obcanskavystavba.cz](http://www.obcanskavystavba.cz/) [online]. 2009-1-19 [cit. 2010-05-01]. Vliv objemových změn na výskyt trhlin v betonových podlahách. Dostupné z WWW: <<http://www.obcanskavystavba.cz/clanek/vliv-objemovych-zmen-na-vyskyt-trhlin-v-betonovych-podlahach/>>.

⁹ ČSN 72 2117 Stanovení pevnosti cementu, 1973